

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra částí a mechanismů strojů



**INOVACE MALÉHO PÁNOVÉHO AGREGÁTU
PRO TAVENÍ SKLOVINY**

**INNOVATION OF A SMALL POT FURNACE
FOR GLASS MELTING**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2014

Bc. Tomáš Stloukal

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš STLOUKAL**

Studijní program: **N2301 – Strojní inženýrství**
Obor: **3909T010 - Inovační inženýrství**

Zaměření: **Inovace výrobků**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Inovace malého pánvového agregátu pro tavení skloviny

Zásady pro vypracování:

Inovujte malý pánvový agregát pro tavení cca. 150 kg skloviny za den. Je požadováno snížení ceny utavené skloviny o 25 % v porovnání s agregátem stávající konstrukce. Současně musí agregát splňovat specifické požadavky na flexibilitu a kvalitu utavené skloviny.

1. Na základě rešerše současných používaných konstrukčních řešení pánvových agregátů a analýzy použitých materiálů specifikovat možnosti a předpoklady řešení.
2. Naplánování projektu. (harmonogram, inovační příležitosti, inovační prohlášení)
3. Návrh tří řešení, zhodnocení jednotlivých variant a výběr nejlepšího řešení.
4. Rozpracování konečné varianty (FMEA, DFX, konstrukce, výpočty, výkresy vybrané varianty)
5. Zhodnocení technických a ekonomických přínosů a využitelnosti navrženého řešení.
6. Závěrečné zhodnocení

Forma zpracování diplomové práce:


- průvodní zpráva: cca 50 stran textu včetně obrázků
- grafické práce: výkresová dokumentace

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

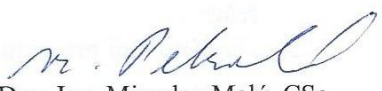
- [1] SMRČEK, A, a kol. Tavení skla. Jablonec n. Nisou: Česká sklářská společnost o.s., 2008
- [2] BELDA, J, Sklářské stroje I. Liberec, Skripta VŠST, 1991
- [3] KLEBSA, V, Technologie skla a keramiky I. Liberec, Skripta VŠST, 1981
- [4] STAŇEK, J, Elektrické tavení skla. Praha, SNTL – nakladatelství technické literatury, 1976
- [5] BARTUŠKA, M, Vady skla. Praha, PRÁH, 2001
- [6] MAŠÍN, I, Metody systematické kreativity. Liberec, Skripta TUL, 2012

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Petrů, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **Ing. Radomír Pelant**


Prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
vedoucí katedry




Doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan fakulty

V Liberci dne 10.1.2014

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

INOVACE MALÉHO PÁNOVÉHO AGREGÁTU PRO TAVENÍ SKLOVINY

INNOVATION OF A SMALL POT FURNACE
FOR GLASS MELTING

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T010 - Inovační inženýrství
Zaměření: Inovace výrobků

Autor práce: **Bc. Tomáš Stloukal**
Vedoucí práce: Ing. Michal Petrů, Ph.D.

Rozsah diplomové práce:

počet stran:	66
počet tabulek:	4
počet obrázků:	23
počet grafů:	2
počet výkresů:	8
počet příloh:	3

Datum: 21. 5. 2014

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá inovací a konstrukčním řešením malého pánvového agregátu pro tavení skloviny. Návrh konstrukčního řešení vychází z dlouholetých zkušeností s provozem pánvových pecí a jsou v něm promítnuty nové poznatky a vývojové trendy. Práce popisuje důvody inovační potřeby, shrnuje výsledky rešerše používaných řešení a popisuje výsledky výpočtů nutných pro konstrukci malého pánvového agregátu. Jsou předloženy návrhy variant koncepčního řešení inovovaného pánvového agregátu a v závěru práce je podrobně rozpracována vybraná varianta. Výsledkem práce je nové konstrukční řešení malého pánvového agregátu pro tavení skloviny. Jeho realizací dojde k výraznému snížení nákladové ceny skloviny určené pro další zpracování.

KLÍČOVÁ SLOVA:

tavení skla, pánvová pec, indukativní ohřev, plynový ohřev

ABSTRACT

The presented dissertation deals with innovation and a construction solution of a small pot furnace for glass melting. The suggested technical design is based on a long-time experience with the pot furnaces operation and reflects the new knowledge and development trends. The dissertation describes reasons for the innovation needs, summarizes research results on the used solutions and describes computation results necessary for a design of a small pot furnace. Different options of conceptual solution for the innovated pot furnace are submitted. The chosen solution is described in details at the end of the dissertation. The result of the thesis is a new design solution small pot furnace for glass melting. Its application will result in a substantial cost price decrease of the glass melt meant for further processing.

KEY WORDS:

glass melting, pot furnace, inductive heating, gas heating

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci dne:

Podpis:

Tomáš Stloukal

Poděkování

Děkuji panu **Ing. Michalu Petru, Ph.D.**, za odborné vedení, vstřícnost, cenné rady a připomínky při řešení této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu **Ing. Radomíru Pelantovi** za poskytnuté informace, ochotu a inspirativní návrhy související s řešením této diplomové práce.

OBSAH:

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM GRAFŮ	10
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	11
1. ÚVOD:.....	12
2. MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ.....	13
2.1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU TECHNIKY	13
2.1.1 <i>Malý tavicí agregát</i>	13
2.1.2 <i>Popis konstrukce stávajícího malého tavicího agregátu</i>	14
2.1.3 <i>Systém otopu</i>	14
2.1.4 <i>Zakládání vsázky</i>	15
2.1.5 <i>Tavení skloviny</i>	15
2.1.6 <i>Homogenizace skloviny</i>	16
2.1.7 <i>Přepouštění skloviny</i>	16
2.1.8 <i>Tvarování výlisků</i>	16
2.1.9 <i>Následné operace</i>	17
2.1.10 <i>Výtěžnost z utavené skloviny</i>	17
2.1.11 <i>Shrnutí nedostatků současného stavu</i>	17
3. NAPLÁNOVÁNÍ INOVACE FORMOU PROJEKTU	18
3.1 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	18
3.2 HARMONOGRAM PROJEKTU	19
3.3 INOVAČNÍ PŘÍLEŽITOSTI	19
3.4 INOVAČNÍ PROHLÁŠENÍ	20
4. PRŮZKUM MOŽNOSTÍ ŘEŠENÍ INOVACE MALÉHO TAVICÍHO AGREGÁTU	21
4.1 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	21
4.1.1 <i>Materiál pánve</i>	21
4.1.2 <i>Konstrukční keramické a izolační materiály</i>	22
4.1.3 <i>Spodní stavba, ocelová konstrukce</i>	22
4.2 MOŽNOSTI OTOPU AGREGÁTU.....	23
4.2.1 <i>Plynový otop tavicího agregátu</i>	23
4.2.2 <i>Kyslíko - plynový otop tavicího agregátu</i>	23
4.2.3 <i>Elektrický (odporový) otop agregátu</i>	23
4.2.4 <i>Elektrický (induktivní) otop agregátu</i>	24

4.2.5	<i>Elektrický (mikrovlnný) otop agregátu</i>	25
4.2.6	<i>Plasmové tavení</i>	26
4.3	DISTRIBUCE SKLOVINY K TVAROVACÍMU STROJI	27
4.4	VÝPOČTY POTŘEBNÉ PRO NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ.....	28
4.4.1	<i>Přestup tepla v tavicím agregátu a orientační výpočet otopu agregátu</i>	28
4.5	SHRNUTÍ MOŽNOSTÍ INOVACE MALÉHO TAVICÍHO AGREGÁTU	29
5.	NÁVRH ALTERNATIVNÍCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ MALÉHO TAVICÍHO AGREGÁTU ...	30
5.1	NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ.....	30
5.1.1	<i>Varianta A</i>	30
5.1.2	<i>Varianta B</i>	31
5.1.3	<i>Varianta C</i>	33
5.2	VÝBĚR VARIANTY PRO KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	34
5.2.1	<i>Stanovení rozhodovacích kritérií</i>	34
5.2.2	<i>Stanovení váhy rozhodovacích kritérií</i>	35
5.2.3	<i>Matice využitelnosti</i>	36
6.	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZVOLENÉ VARIANTY	39
6.1	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	39
6.2	NÁVRH KERAMICKÝCH KOMPONENT	42
6.2.1	<i>Tavicí pánev</i>	42
6.2.2	<i>Vnitřní radiální vyzdívka</i>	43
6.3	NÁVRH A SKLADBA IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	44
6.4	NÁVRH ZPŮSOBU OHŘEVU PRO MALÝ TAVICÍ AGREGÁT.....	45
6.5	NÁVRH A VÝPOČET OCELOVÉ KONSTRUKCE	47
6.6	NÁVRH PODHLADINOVÉHO VÝTOKU SKLOVINY	51
6.7	UPLATNĚNÍ PRINCIPŮ DETAILNÍHO KONSTRUOVÁNÍ (DFX)	52
6.8	PŘEZKOUMÁNÍ KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU POMOCÍ METODY FMEA	53
7.	ZÁVĚRY A ZHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI	55
7.1	ZHODNOCENÍ TECHNICKÝCH A EKONOMICKÝCH PŘÍNOSŮ ŘEŠENÍ	55
7.1.1	<i>Zhodnocení technických přínosů</i>	55
7.1.2	<i>Zhodnocení ekonomických přínosů</i>	56
7.2	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	60
	SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE:	62
	PŘÍLOHY.....	63

Seznam obrázků

<i>Obr.1 – Řez malým pánvovým agregátem stávající konstrukce</i>	<i>14</i>
<i>Obr.2 – Ukázka vizualizace tavicí křivky MTA (tavba 3.-4.6.2011)</i>	<i>15</i>
<i>Obr.3 – Ukázka pánvového agregátu otápěného odporovými smyčkami</i>	<i>24</i>
<i>Obr.4 – Příklad možného uspořádání indukčního ohřevu</i>	<i>25</i>
<i>Obr.5 – Schéma mikrovlnné pece na tavení skla</i>	<i>26</i>
<i>Obr.6 – Ukázka plasmové pece - projekt US Department of Energy</i>	<i>27</i>
<i>Obr.7 – Zjednodušený model varianty A (řez)</i>	<i>31</i>
<i>Obr.8 – Zjednodušený model varianty B (řez)</i>	<i>32</i>
<i>Obr.9 – Zjednodušený model varianty C (řez)</i>	<i>33</i>
<i>Obr.10 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (celkový pohled).....</i>	<i>39</i>
<i>Obr.11 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (tříčtvrtinový řez tavicí částí)</i>	<i>40</i>
<i>Obr.12 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (řez tavicí částí).....</i>	<i>41</i>
<i>Obr.13 – Řez pánví malého tavicího agregátu</i>	<i>42</i>
<i>Obr.14 – Sestava radiálního zdiva tavicího prostoru</i>	<i>44</i>
<i>Obr.15 – Skladba tepelně-izolačních materiálů malého tavicího agregátu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr.16 – Model hořáku s keramickým spalovacím kanálem</i>	<i>45</i>
<i>Obr.17 – Model vývoje teplotního pole inovovaného MTA při ohřevu na tavicí teploty. ..</i>	<i>46</i>
<i>Obr.18 – Ocelová konstrukce inovovaného malého tavicího agregátu.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr.19 – Směr a plocha působení spojitého zatížení konzole.</i>	<i>48</i>
<i>Obr.20 – Ukotvené plochy hlavního rámu a návrh sítě pro další výpočet.</i>	<i>48</i>
<i>Obr.21 – Rozložení průběhu napětí v ocelové konstrukci agregátu.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr.22 – Simulace posunutí zatížené konstrukce.</i>	<i>50</i>
<i>Obr.23 – Boční pohled a řez podhladinovým výtokem skloviny.....</i>	<i>51</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka č.1 – Párové hodnocení kritérií</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka č.2 – Stanovení váhy kritérií</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka č.3 – Rozhodovací analýza využitelnosti variant.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka č.4 – Nákladové porovnání variant</i>	<i>56</i>

Seznam grafů

<i>Graf č.1 – Výsledky rozhodovací analýzy.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf č.2 – Porovnání jednotlivých složek nákladové ceny skloviny.....</i>	<i>57</i>

Seznam zkratk a symbolů

MTA	[-]	<i>malý tavicí agregát</i>
FMEA	[-]	<i>failure mode and effects analysis</i>
DFX	[-]	<i>design for X</i>
DFA	[-]	<i>design for assembly</i>
DFD	[-]	<i>design for disassembly</i>
DFE	[-]	<i>design for environment</i>
PLM	[-]	<i>product lifecycle management</i>
AZS	[-]	<i>materiál na bázi SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂</i>
v_i	[-]	<i>váha i-tého kritéria</i>
p_i	[-]	<i>i-té kritérium</i>
k	[-]	<i>počet kritérií</i>
m	[kg]	<i>hmotnost</i>
m_{sk}	[kg]	<i>hmotnost skloviny</i>
ρ_{sk}	[kg.m ³]	<i>měrná hmotnost skloviny</i>
t	[°C]	<i>teplota</i>
t_{int}	[°C]	<i>teplota vnitřního povrchu stěny</i>
t_{ext}	[°C]	<i>teplota vnějšího povrchu stěny</i>
Q	[W]	<i>výkon tepelný</i>
Q_o'	[W.m ⁻²]	<i>koeficient tepelné vodivosti</i>
P_i	[W]	<i>výkon instalovaný</i>
P_t	[W]	<i>výkon potřebný</i>
S	[m ²]	<i>plocha</i>
f	[Hz]	<i>frekvence</i>
λ	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	<i>součinitel tepelné vodivosti</i>
d	[m]	<i>průměr</i>
v	[m]	<i>výška</i>
q_m	[W]	<i>teoretická spotřeba energie</i>
t_p	[s]	<i>čas požadovaný</i>
η	[%]	<i>koeficient využití pánve</i>
V_{po}	[m ³]	<i>objem pánve požadovaný</i>
V_{sku}	[m ³]	<i>objem pánve skutečný</i>
k_{bzp}	[-]	<i>koeficient bezpečnosti</i>
R_e	[Pa]	<i>mez kluzu</i>
σ_{red}	[Pa]	<i>napětí redukované</i>
M_k	[N.m]	<i>točivý moment</i>

1. ÚVOD:

Tavení skla v pánvích je historicky nejstarší technologií tavení skla s tisíciletou tradicí. Pánvové tavicí agregáty převažovaly až do šedesátých let dvacátého století v užitkovém skle, osvětlovacím skle a bižuterní výrobě. V dalších letech byla hlavní výrobní kapacita převedena na kontinuální agregáty. I přes tento fakt mají pánvové agregáty do budoucna své opodstatnění. Zejména v bižuterní výrobě, kde je nutno vyrábět širokou škálu barevných skel a skel s odlišným základním složením.

Předkládaná diplomová práce s názvem *Inovace malého pánvového agregátu pro tavení skloviny* je zaměřena na řešení inovace malého pánvového agregátu s důrazem na snížení nákladové ceny utavené skloviny oproti agregátu stávající konstrukce. Práce je rozdělena do sedmi kapitol. První kapitola je úvodní, další kapitoly jsou věnovány jednotlivým bodům zadání.

Druhá kapitola se zabývá stávajícím stavem techniky. Jsou zde rozebrány jednotlivé technologické postupy využívané při výrobě skleněné suroviny pro strojně broušené kameny a perle a je popsán stávající tavicí agregát. Ve třetí kapitole je provedeno naplánování inovace formou projektu. Jsou specifikovány cíle řešení, vytvořen harmonogram projektu, popsány inovační příležitosti a zformulováno inovační prohlášení. Ve čtvrté kapitole jsou, na základě provedené patentové a literární rešerše, rozpracovány možnosti a principy pánvových agregátů v obecné rovině. Jsou shrnuty možnosti řešení, tak jak jsou zmíněny v dostupných zdrojích. Jsou zde popsány materiálové možnosti konstrukce, využitelné způsoby ohřevu a proveden výpočet rozhodných parametrů pro další řešení. V páté kapitole jsou navrženy varianty řešení a pomocí rozhodovací analýzy je vybrána optimální varianta pro podrobné zpracování. V šesté kapitole je rozpracováno konstrukční řešení zvolené varianty. Na základě získaných poznatků je navržen a zkonstruován inovovaný malý tavicí agregát. Ten je zpracován formou sestavné výkresové dokumentace, která tvoří přílohu této práce. V závěru kapitoly je provedeno prověření konstrukce pomocí metody FMEA. V sedmé kapitole jsou vyhodnoceny technické a ekonomické přínosy zvoleného řešení a využitelnost navržené inovace. Následuje celkové zhodnocení dosažených výsledků a jejich souladu se zadáním.

Výstupem této práce je inovované konstrukční řešení malého tavicího agregátu pro tavení skloviny. Nedílnou součástí je zhodnocení technicko-ekonomického přínosu inovace a výkresová dokumentace sestavy a vybraných součástí.

2. MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ

V této kapitole je uveden popis a rozbor výchozího stavu techniky a popsána problematika výroby skleněných polotovarů na pánvovém agregátu. V závěru jsou shrnuty nedostatky stávajícího stavu, ze kterých bude vycházet další řešení diplomové práce.

2.1 Analýza současného stavu techniky

PRECIOSA a.s. je předním světovým producentem broušeného křišťálu a soustředí se především na výrobu strojně broušených šatonů, perlí a jiných bižuterních komponentů v širokém sortimentu tvarů, velikostí a barev. Součástí firmy je hutní základna, která se věnuje výrobě suroviny pro výrobu strojně broušených kamenů a perlí.

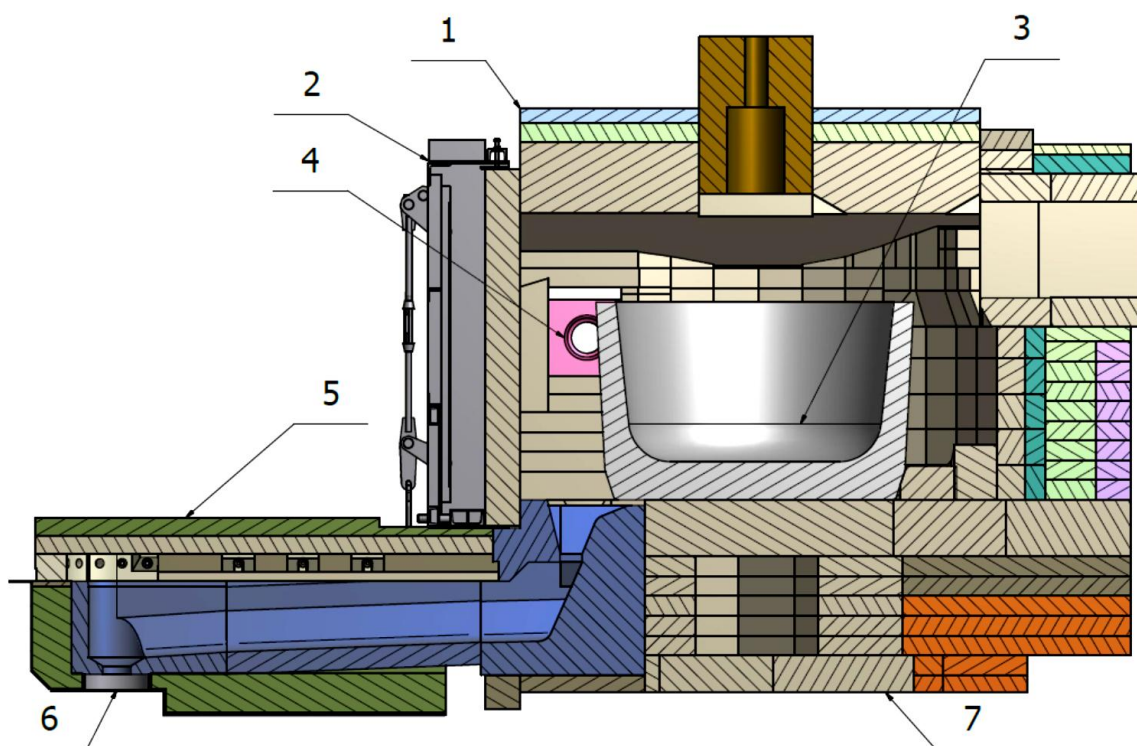
2.1.1 Malý tavicí agregát

Malý tavicí agregát (dále také MTA), používaný pro tavení skla, slouží především pro výrobu skleněných polotovarů v širokém sortimentu tvarů, velikostí a barev. Koncepce tohoto malokapacitního zdroje skloviny pro tavení cca. 150 kg skla za den vychází z konstrukce běžně využívaného jedno-pánvového tavicího agregátu s tangenciálním plynovým otopem. Ten umožňuje tavení 600 kg skloviny za den. S používáním tohoto druhu pánvových pecí jsou více než 20 leté provozní zkušenosti a kvalita utavené skloviny je vyhovující pro účel jejího použití. Vzhledem k menšímu objemu utavené skloviny, vyšším teplotním ztrátám a nižší výtěžnosti jsou však náklady na 1 kg utavené skloviny u malého tavicího agregátu výrazně vyšší.

S přihlédnutím k neustále se zvyšujícímu tlaku na šíři dodávaného sortimentu výlisků v barvách i tvarech a s klesajícím objemem jednotlivých výrobních dávek je výhodné přejít z tavení skloviny na standartních agregátech na tavení skloviny na MTA. Předpokladem tohoto postupu je zachování ekonomických parametrů výroby dosahovaných na velkých pánvových agregátech. To předpokládá snížení nákladové ceny skloviny produkované na MTA minimálně o 25 %.

2.1.2 Popis konstrukce stávajícího malého tavicího agregátu

Jednotlivé části MTA jsou zřejmé z obrázku č.1. Vlastní těleso MTA tvoří spodní stavba 7 a klenba 1. Vkládání sklářské pánve 3 probíhá po zdvihnutí vrat zakládacího otvoru 2. Pánev je otápěna plynovým tangenciálním hořákem, který je umístěný v hořákové tvarovce 4. Distribuce skloviny probíhá jejím přepuštěním do feedru 5, odkud je výtokovou dýzou 6 směřována k tvarovacímu stroji.



Obr.1 – Řez malým pánvovým agregátem stávající konstrukce

- 1) klenba 2) vrata pro zakládání pánve 3) pánev 4) hořáková tvarovka 5) feeder 6) výtoková dýza
7) spodní stavba pece

2.1.3 Systém otopu

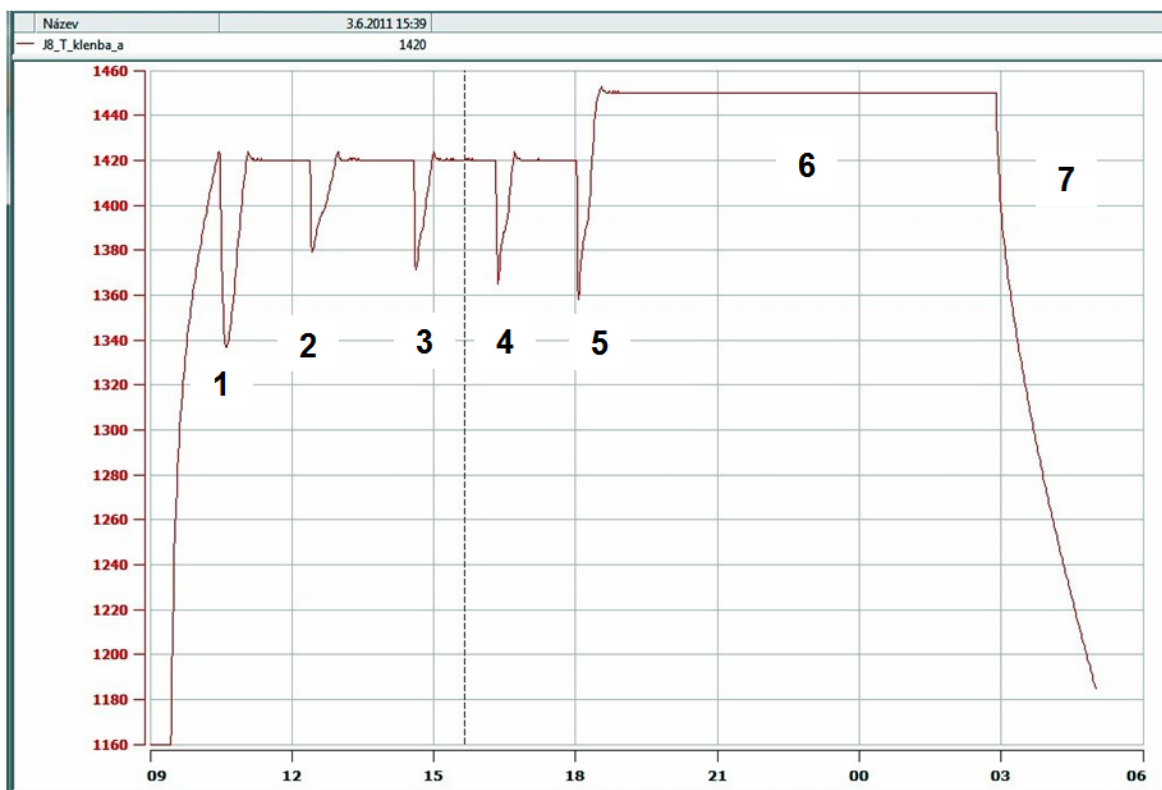
Agregát je otápěn plynovým hořákem umístěným v hořákové tvarovce. Hořáková tvarovka je zastavěna do tělesa agregátu. Spalování probíhá v prostoru okolí sklářské pánve a odtah spalin je veden přes přisazený rekuperátor. V rekuperátoru dochází k předehevu spalovacího vzduchu na teplotu přibližně 300°C a k ochlazení spalin pod 600°C. Spaliny jsou dále odváděny přes systém kanálů do centrálního filtračního zařízení a poté do komína. Využitím rekuperovaného tepla pro ohřev spalovacího vzduchu dochází k úspoře nákladů na chod MTA.

2.1.4 Zakládání vsázky

Kmen a střepy se do malého tavicího agregátu zakládají odděleně. Lze zakládat zakládacím dělem nebo ručně. Celková hmotnost nakládky se pohybuje kolem 150 kg. Zakládání probíhá na etapy. V první etapě jsou založeny střepy. Po jejich protavení jsou založeny čtyři stejně velké dávky kmene zhruba v hodinových intervalech.

2.1.5 Tavení skloviny

Tavicí teplota se pohybuje v rozsahu 1440°C – 1460°C a délka tavby je průměrně 8 hodin. Po utavení následuje sejítí na pracovní teplotu. Pracovní teplota se výrazně liší podle příslušné skloviny a pohybuje se v intervalu 1050°C – 1250°C . Podrobnější představu o vedení tavby lze získat z vizualizace časové závislosti teploty na obrázku č.2. Na ose X je vyneseno čas v hodinách, na ose Y teplota ve stupních Celsia. Znázorněná křivka zobrazuje časový průběh teploty naměřené termočlánkem v klenbě pánvového agregátu.



Obr.2 – Ukázka vizualizace tavicí křivky MTA (tavba 3.-4.6.2011)

1) nakládka střepů 2-5) nakládka kmene 6) tavení 7) sejítí na pracovní teplotu

2.1.6 Homogenizace skloviny

Po roztavení vsázky a dosažení čerčících teplot se v současnosti provádí homogenizace keramickým míchadlem. Míchadlo je osazené v ose pánve a je uchyceno na vodou chlazeném hřídeli. Výška míchadla vzhledem k hladině skloviny je dána technologickým předpisem. Je pro rozdílné skupiny skel různá a může se v průběhu tavy měnit. Homogenizace skla má tři cíle:

- ✓ uvést sklovinu do pohybu
- ✓ zamícháním homogenizovat sklovinu a odstranit případné šlíry
- ✓ spojit drobné bublinky ve větší

2.1.7 Přepouštění skloviny

Po utavení a sejítí na pracovní teplotu je sklovina kontinuálně přepouštěna do feedru⁽¹⁾. Ve feedru je po dobu zpracování udržována stálá hladina skloviny a její výška je regulována obsluhou tvarovacího stroje. Sklovina je postupně odebírána tvarovacím strojem až do jejího úplného vypracování.

Při přepouštění dochází ke kontaminaci skloviny korozními produkty keramického materiálu feedru a k odtěkávání složek skloviny. To způsobuje zvýšené procento neshodných výrobků z titulu opticko-estetických vad a tím snížení celkové výtěžnosti.

2.1.8 Tvarování výlisků

Tvarování probíhá na RM či UM tvarovacím stroji. Oba tyto stroje tvarují surovinu z vytékajícího pramínku skloviny, ale výrazně se liší způsobem tvorby výlisku. RM tvaruje na principu dvou proti sobě se otáčejících rolen. Jeho předností je vysoká produktivita. UM tvaruje pomocí tzv. kaplíků, což jsou formy pohybující se paralelně proti sobě. Výhodou tohoto tvarovacího stroje je širší rozsah sortimentu a možnost výroby suroviny s dírkou. Nevýhodou oproti RM je výrazně nižší produktivita. Tvarování probíhá v teplotním rozsahu 780°C – 970°C a teplota tvarování je závislá na složení základní skloviny.

⁽¹⁾ **Pozn.** Součástí tavicího agregátu sloužící k transportu skloviny k tvarovacímu stroji.

2.1.9 *Následné operace*

Po vytvarování a vychladnutí jsou výlisky převezeny na operaci šitlování, kde dochází k oddělení výlisku od přelisku. V některých případech následuje po šitlování operace kulacení⁽²⁾ nebo nabíhání⁽³⁾, které jsou odvislé od typu skla a dalšího využití suroviny v následném toku výroby. Po nezbytné výstupní kontrole kvality je surovina připravena k expedici na brusírenské závody.

2.1.10 *Výtěžnost z utavené skloviny*

Po utavení a přepuštění skloviny do feedru prochází sklovina přes otápěnou dýzu k tvarovacímu stroji. Tento cyklus se opakuje každých 24 hodin a v jeho průběhu dochází ke ztrátám, které ovlivňují celkovou výtěžnost zařízení. Hlavními výrobními ztrátami jsou zejména:

- ✓ *ztráty při tavení* – přepěnění vsázky, rozprach při zakládání
- ✓ *ztráty při přepouštění* – stabilizace, zbytková sklovina⁽⁴⁾
- ✓ *ztráty při tvarování* – temperace tvarovacího stroje, velikost přelisku

Výtěžnost z utavené skloviny se u malého tavicího agregátu, s ohledem na prezentované ztráty, pohybuje okolo 75 % .

2.1.11 *Shrnutí nedostatků současného stavu*

Největším nedostatkem současného uspořádání malého tavicího agregátu jsou vyšší náklady na kg utavené skloviny v porovnání s velkou pánvovou pecí. Je to způsobeno především relativně vysokou vstupní investicí při stavbě agregátu a také náklady na provozní energii a opravy. Svůj díl nese také nižší výtěžnost z utavené skloviny.

Tyto nedostatky řeší předkládaná diplomová práce s názvem ***Inovace malého pánvového agregátu pro tavení skloviny***, jehož návrh a konstrukce jsou součástí této práce.

⁽²⁾ **Pozn.** Optimalizace povrchu výlisku (kuličky) koulením za zvýšené teploty.

⁽³⁾ **Pozn.** Dosažení požadovaného barevného odstínu sekundárním ohřevem.

⁽⁴⁾ **Pozn.** Sklovina, která zůstává po vypracování v prostoru dna pánve.

3. NAPLÁNOVÁNÍ INOVACE FORMOU PROJEKTU

V této kapitole jsou specifikovány předpokládané cíle diplomové práce a je provedeno naplánování řešení inovace formou projektu. Je vypracován harmonogram řešení (Ganttův diagram), definovány inovační příležitosti a na jejich podkladě je sestaveno inovační prohlášení.

3.1 Cíle diplomové práce

Nákladová cena utavené skloviny, jak již bylo popsáno v předcházejícím textu, je hlavní důvodem potřeby inovovat malý tavicí agregát. Oproti velkému pánvovému agregátu (600 kg skloviny/den) je nákladová cena zhruba na dvojnásobné úrovni. Z tohoto poznatku vycházejí cíle diplomové práce.

Hlavním cílem této diplomové práce je inovace malého pánvového agregátu pro tavení cca. 150 kg skloviny za den. Je požadováno snížení ceny utavené skloviny o 25 % v porovnání s agregátem stávající konstrukce. Současně musí agregát splňovat specifické požadavky na flexibilitu a kvalitu utavené skloviny.

Dílčí cíle diplomové práce jsou následující:

- ✓ Na základě současných používaných konstrukčních řešení pánvových agregátů a analýzy použitých materiálů specifikovat možnosti a předpoklady řešení.
- ✓ Naplánovat projekt (harmonogram, inovační příležitosti, inovační prohlášení).
- ✓ Navrhnout tři varianty řešení a provést jejich zhodnocení.
- ✓ Vybrat vhodnou variantu na základě rozhodovací analýzy.
- ✓ Navrhnout a konstrukčně vyřešit vybraný koncepční návrh (FMEA, DFX, sestavné výkresy).
- ✓ Provést zhodnocení přínosu a využitelnosti navrženého řešení.

3.2 Harmonogram projektu

Harmonogram projektu byl vytvořen pomocí programu MS Project 2010. MS Project je aplikace pro plánování a řízení projektů, sledování termínů, přiřazování zdrojů a sledování jejich využití. Umožňuje také výpočet kritické cesty a zobrazení různých pohledů na projekt. Výstupem pro potřeby této práce je časový harmonogram v podobě Ganttova diagramu. Vytvořený Ganttův diagram je součástí přílohy č.1.

3.3 Inovační příležitosti

Po prověření stavu techniky, provedení strukturovaných rozhovorů s kompetentními pracovníky zadavatele a popsání nedostatků stávajícího stavu byly identifikovány inovační příležitosti, které budou rozvinuty v dalším řešení. Mezi hlavní inovační příležitosti patří zejména tyto:

- ✓ snížit nárok na zastavěnou plochu;
- ✓ snížit hmotnost zařízení;
- ✓ snížit náklady na pořízení agregátu (vstupní investice);
- ✓ snížit provozní náklady;
- ✓ snížit energetickou náročnost;
- ✓ minimalizovat náklady na opravy;
- ✓ zvýšit výtěžnost z utavené skloviny;
- ✓ optimalizovat možnost regulace otopu;
- ✓ zajistit minimální ovlivnění skloviny topným médiem;
- ✓ minimalizovat nároky na kvalifikaci obsluhy;
- ✓ minimalizovat vliv a dopady na životní prostředí;
- ✓ zajistit přiměřenou životnost zařízení;
- ✓ komfort regulace výtoku skloviny;

3.4 Inovační prohlášení

V tomto kroku byl zformulován návrh inovačního prohlášení. Jsou zde sumarizovány směry a možnosti, kterými se bude tato práce ubírat při dalším řešení inovace malého tavicího agregátu.

- **Popis výrobku:** *malý pánvový agregát pro tavení skloviny;*
- **Klíčové cíle:** *zabezpečení flexibilní kapacity pro tavení skloviny především v bižuterním průmyslu;*
- **Primární trh:** *hutní základna firem skupiny Preciosa;*
- **Sekundární trh:** *sklářská studia, sklářské školy, malé ruční sklářské provozy;*
- **Předpoklady a omezení:** *Výrobek bude určen pro tavení malých dávek skloviny, doplňkového sortimentu tvarů a barev a v neposlední řadě k výrobním inovacím na poli strojně broušených kamenů a perlí. Jeho silnou stránkou bude značná flexibilita, vysoká výtěžnost a přiměřená cena utavené skloviny.*
- **Účastníci inovačního procesu:** *Tomáš Stloukal, Radomír Pelant, Michal Petrů*

4. PRŮZKUM MOŽNOSTÍ ŘEŠENÍ INOVACE MALÉHO TAVICÍHO AGREGÁTU

V této kapitole jsou shrnuty výsledky provedené literární a patentové rešerše a na jejich základě je proveden rozbor možností inovace tavení skloviny v pánvové peci. Byly vyhledány nové směry v konstrukci pánvových a kelímkových pecí, prověřeny možnosti otopů a provedena rešerše kontaktních a izolačních žáromateriálů. V závěru kapitoly jsou provedeny výpočty nezbytné pro tvorbu návrhu variant řešení.

4.1 Konstrukční materiály

4.1.1 *Materiál pánve*

Proces tavení je situován do prostoru tavicí pánve. Je opakovaně přerušován nakládkami studené vsázky, čímž v pánvi vzniká vertikální teplotní gradient. I proto jsou na materiál sklářské pánve kladeny extrémní nároky. Pánev musí odolávat působení vysokých teplot, korozi složkami vsázky i tavenou sklovinou a musí být odolná vůči praskání při náhlých změnách teploty.

Při tavení skla se využívají dva druhy keramických materiálů. Prvními jsou pánvové hmoty na bázi SiO_2 a Al_2O_3 . Ty mají velké smrštění při výpalu, malou odolnost proti praskání a jsou relativně levné. Jejich nevýhodou je dlouhá doba dodání, která souvisí s technologickými procesy v keramické hmotě. Dále pak nutnost pomalé temperace a slinování před prvním použitím. Druhou skupinou jsou materiály ze sintrovaného keramického materiálu na bázi SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 . Ty mají nízkou porozitu, dobrou odolnost proti praskání a vydrží nasazení za vyšších teplot. Jejich nevýhodou je vyšší pořizovací cena.

Při stavbě tavicích agregátů se také v hojné míře využívá drahokovových kelímků. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně se jedná především o agregáty pro speciální účely. Ve většině případů se využívá slitina platiny a rhodia v poměru 9:1. Další z možností využití jsou nástříky PtRh slitiny na keramickou matici.

4.1.2 *Konstrukční keramické a izolační materiály*

U plynem otápěných pánvových agregátů musí být vnitřní radiální zdivo, které je v přímém kontaktu s plamenem a na jehož povrchu probíhá kontaktní spalování, z vysoce kvalitních hlinitých slinovaných materiálů. Přejít radiálního zdiva do klasické obezdívky šamotovým a izolačním zdivem bývá umožněn výplní z žárobetonu s nízkým obsahem cementu. U pecí moderních konstrukcí je možné navázat na radiální zdivo přímo kvalitní izolací splňující požadovanou teplotní klasifikaci. U agregátů a alternativním typem otopu nejsou požadavky na vnitřní vyzdívku agregátu tak přísné. Na trhu je velké množství dodavatelů a záleží na účelu použití a osobních zkušenostech konstruktéra, kterou variantu zvolí.

4.1.3 *Spodní stavba, ocelová konstrukce*

Spodní stavba agregátu má několik funkcí. Jak ze samotného názvu vyplývá tato část tvoří základ pece, na něm je umístěna pánve a celá horní stavba. Přes spodní stavbu jsou odtahovány spaliny a je v ní umístěna skelná jímka, která slouží k odtoku skloviny z tavicího prostoru v případě přepěnění skloviny či prasknutí pánve.

Vzhledem k předpokládané potřebě minimalizace konstrukce tavicího agregátu, bude vhodné v dalším řešení zvažovat výraznou redukci spodní stavby. Nosnou funkci bude možné nahradit ocelovou konstrukcí a pod agregátem získat prostor pro umístění tvarovacího stroje. To umožní koncepčně inovovat způsob distribuce skloviny k tvarovacímu stroji. Ostatní funkce spodní stavby jako je odvod spalin, nebo umístění skelné jímky, bude nutné konstrukčně vyřešit jiným způsobem. Odvod spalin pouze v případě plynového otopu, absenci skelné jímky i v případě alternativních způsobů otopu.

Při návrhu variant řešení bude přihlédnuto k uvažované změně skladby žáromateriálů horní stavby agregátu a předpokládané změně konstrukce spodní stavby. Výhodné bude uzavřít celou horní stavbu do ocelového pláště tak, jak se s tím můžeme setkat např. u pecí ateliérových. Umožní to lepší ochranu vláknité tepelné izolace agregátu. Ocelová konstrukce pak převezme nosnou funkci spodní stavby.

4.2 Možnosti otopu agregátu

4.2.1 Plynový otop tavicího agregátu

Zemní plyn je nejběžněji využívaný zdroj energie pro otop pánvových a kelímkových pecí. Vzhledem k velkému rozšíření je s tímto druhem otopu dostatek zkušeností a díky tomu existuje výborné technické zázemí pro jeho aplikace. Palivem je v tomto případě zemní plyn. Spalována je jeho směs se vzduchem. K zavedení paliva do pecního prostoru je využíváno kovových hořáků nejrůznější konstrukce, lišících se podle uspořádání spalovacího prostoru agregátu. Hořáky jsou do tělesa agregátu uchyceny pomocí hořákové tvarovky z litého žáromateriálu AZS nebo zirkonmullitu. Sortiment hořáků dodávaných pro sklárství má rozsah 25 kW až 6 MW. Pro požadovaný tavicí výkon agregátu je potřebný instalovaný výkon hořáků max. 200 kW.

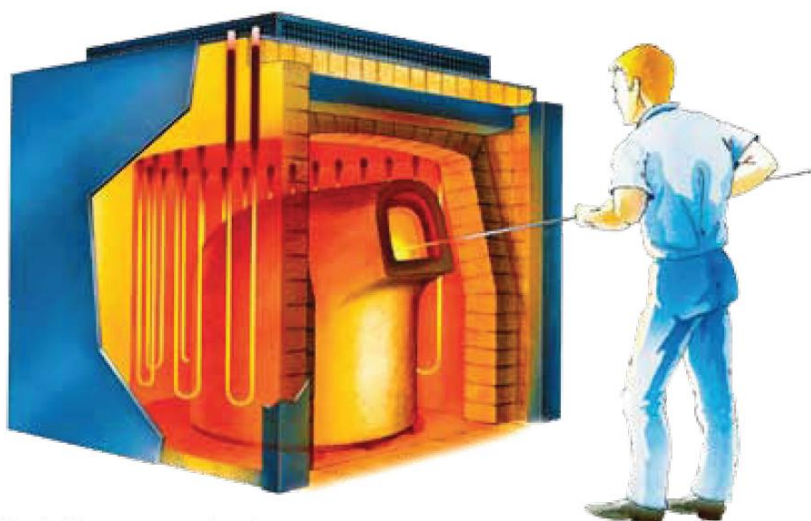
4.2.2 Kyslíko - plynový otop tavicího agregátu

Účinnost plynového otopu lze zvýšit využitím kyslíku. Používá se dotování plynového plamene kyslíkem, nebo spalování směsi plyn/kyslík. Při tomto způsobu otopu je možné dosáhnout s krátkým plamenem velmi vysokých teplot.

Vzdušný dusík odnáší teplo, vodní páry a prachové úlety, ale současně umožňuje tvorbu NO_x . To je důvodem proč plně kyslíko-plynové agregáty spotřebovávají méně paliva a uvolňují menší množství prachových úletů, NO_x a CO_2 . Využitím kyslíku se redukuje množství spalin až o 70 %, při stejném průtoku paliva.

4.2.3 Elektrický (odporový) otop agregátu

Topným médiem je elektřina. Otop agregátu zajišťují odporové topné články z MoSi_2 , který odolává oxidaci při vysokých teplotách. Toto je možné díky uspořádání tenké a adhezí ochranné vrstvy křemíkových krystalů na povrchu. Materiál článků kombinuje vlastnosti kovových a keramických materiálů. Jako kovový materiál má dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a jako keramický materiál dobře odolává korozi a oxidaci a má nízkou teplotní roztažnost. Tepelný výkon topných článků je $30\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ a max. dosažitelná teplota do 1800°C . Uspořádání topných elementů v elektrickém pánvovém agregátu je znázorněno na obrázku č.3.

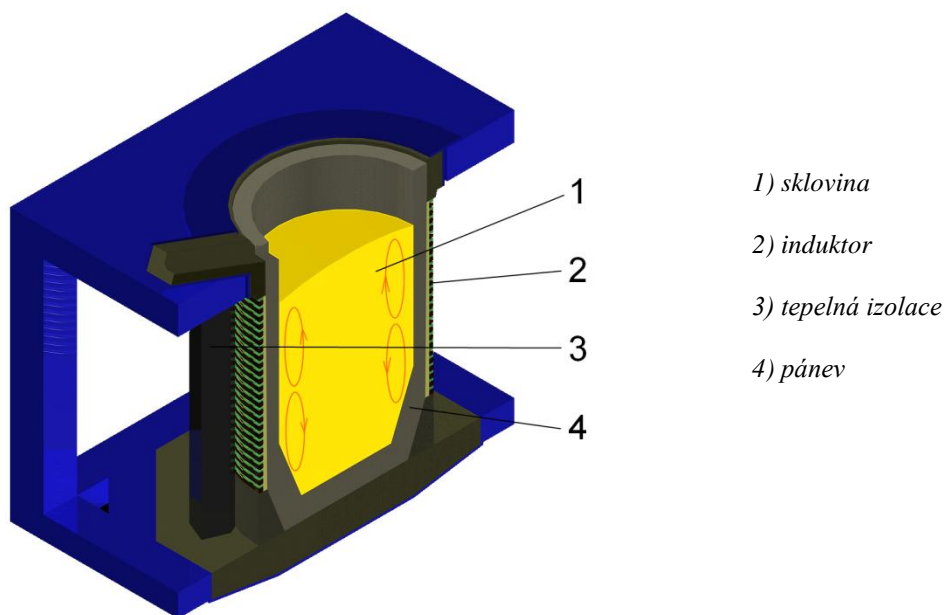


Obr.3 – Ukázka pánvového agregátu ohřívěného odporovými smyčkami [1]

Topné články jsou zavěšeny po obvodu pánve tak, že část smyčky o větším průměru (netopná část) prochází otvorem v klenbě agregátu a je osazena vzduchem chlazeným držákem. Plocha jedné smyčky je 452 cm^2 , což dává topný výkon $13,5 \text{ kW}$. Pro uvažovanou velikost pece při účinnosti otopu 80% bude nutné instalovat 10 takovýchto smyček. Předpokládaný instalovaný výkon bude 135 kW .

4.2.4 Elektrický (induktivní) otop agregátu

Topným médiem je elektřina. Tepelná energie při induktivním otopu vzniká ohřevem vodivého materiálu (obvykle kovu) vířivými proudy, které se v něm indukují elektromagnetickým polem. Pro tavení skla se používá generátor o střední frekvenci a měděný induktor. Induktorem je měděná trubka stočená ve tvaru šroubovice kolem tavicí pánve. Vzhledem k dosahovaným teplotám při tavení (1450°C) je třeba měděné komponenty chladit, proto induktorem neustále protéká chladicí voda. Mezi tavicí pánv a induktor je vložen prvek z karbidu křemíku nebo vhodného kovového materiálu, na kterém se vybavuje teplo potřebné k ohřevu tavicí pánve a tavené skloviny. Hlavní výhodou tohoto otopu je vysoká účinnost, protože se materiál ohřívá přímo a tepelné ztráty jsou oproti např. plynovému otopu zhruba poloviční. Předpokládaný výkon generátoru pro uvažovanou velikost pece je 100 kW . Princip induktivně ohřívěného kelímku je patrný z obrázku č.4.

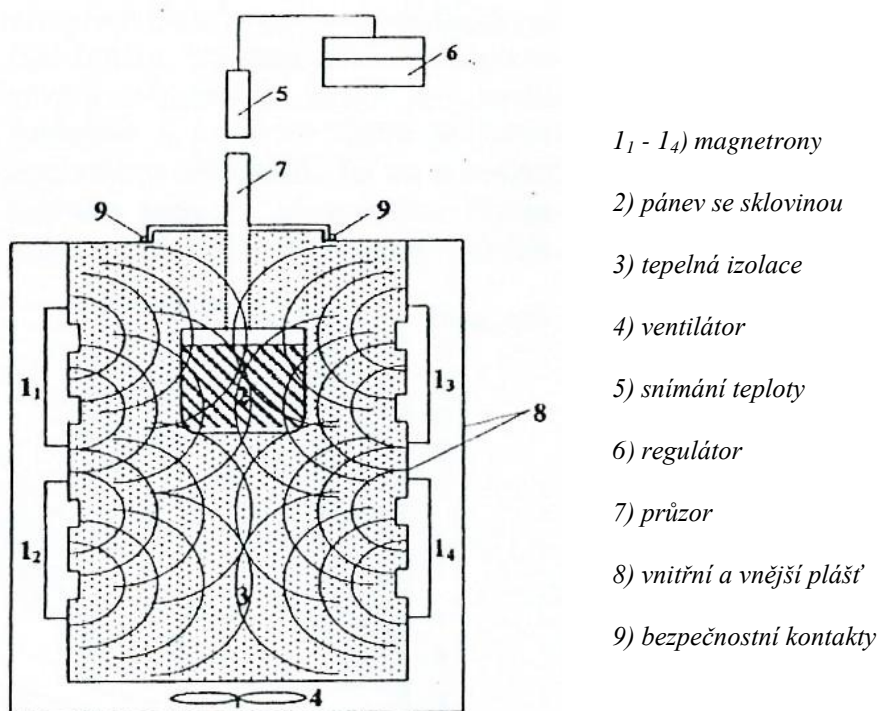


Obr.4 – Příklad možného uspořádání indukčního ohřevu [2]

4.2.5 Elektrický (mikrovlnný) otop agregátu

Metoda tavení skel, která je vyvíjena od konce 20. století. Topným médiem je elektřina. Mikrovlny jsou emitovány pomocí magnetronů o frekvenci 2,4 GHz a jsou pohlcovány bezprostředně ve vsázce a sklovině. Tím vzniká potřebné teplo. Současná mikrovlnná zařízení mají výkony 100 kW i více a vykazují velmi dobrou účinnost. Specifická spotřeba elektrické energie je uváděna mezi $0,5 - 1 \text{ kWh.kg}^{-1}$ utavené skloviny. Protože je známo, že sklo mikrovlny neabsorbuje (tudíž se neohřívá) je třeba absorpci nastartovat. To je možné provést buď konvenčním předehřátím nebo zkoncentrováním energie do jednoho místa pomocí aktivačního tělíska. Tak dojde k lokálnímu ohřevu a následnému natavení, které se rychle rozšíří do celého objemu. Schéma mikrovlnné pece na tavení skla je znázorněno na obrázku č.5.

Další možností je využití vysokofrekvenčních mikrovln, na frekvenci řádově desítek GHz. Účinnost těchto zařízení je okolo 80%, rychlost ohřevu až $1000^{\circ}\text{C.s}^{-1}$. Zdrojem záření je chlazený generátor, který emituje mikrovlny ve formě paprsku. Ten lze pomocí soustavy zrcadel fokusovat či tvarovat do požadované plochy. V surovinách i sklovině pak nastává absorpce energie. To se děje v tzv. penetrační hloubce, kde se vybaví většina předávané energie. Ta se liší podle materiálu a frekvence mikrovlnného záření.

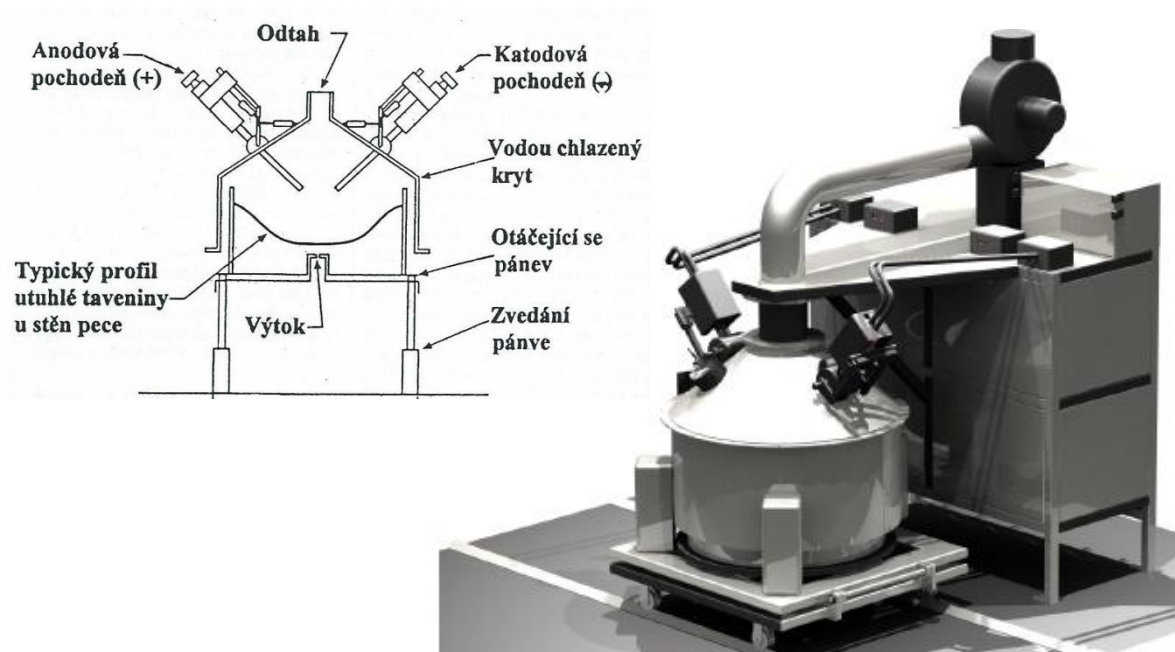


Obr.5 – Schéma mikrovlnné pece na tavení skla [2]

4.2.6 Plasmové tavení

Spočívá v rychlé tvorbě taveniny za pomoci plasmy. Prášková vsázka padá nebo je unášena nosným plynem mezi plasmové hořáky. Tam dochází díky vysoké teplotě plasmy k okamžitému tavení. Aparatura vyžaduje inertní atmosféru. K tavení je potřeba správná granulometrie vsázky.

Dosud jsou zdokumentovány aplikace převážně pro speciální účely, především pro produkci technických výrobků s vysokou přidanou hodnotou. Plasmová zařízení jsou drahá a průmyslové využití pouze výjimečně. Životnost těchto zařízení pro sklářské účely není příliš prozkoumána. Testy, které jsou popsány v literatuře, naznačují nutnost používat jemné prášky jako vstupní suroviny a to pak cenu vsázky značně prodražuje a zužuje rozsah možných dodavatelů surovin. Obrázek č.6 ukazuje model plasmové pece pro tavení, zhotovený v rámci projektu amerického ministerstva pro energetiku.



Obr.6 – Ukázka plasmové pece - projekt US Department of Energy [3]

4.3 Distribuce skloviny k tvarovacímu stroji

Hlavní nevýhodou dosud používaného způsobu distribuce skloviny je jeho velikost. Při průchodu skloviny feedrem směrem k tvarovacímu stroji dochází k odtěkávání složek skloviny a k jejímu ulpívání na stěnách feedru. To ve svém důsledku způsobuje zvýšení neshodné výroby, snížení výtěžnosti a tím růst nákladové ceny zpracovávané skloviny.

Pro distribuci skloviny k tvarovacímu stroji je proto vhodné využít spodní výtok, který je přisazený přímo ke dnu tavicí pánve. K jeho ohřevu lze využít odporový i induktivní způsob. Materiál, který bude ve styku se sklovinou, může být keramický nebo z žáruvzdorné oceli.

Hlavní výhodou takto navrženého výtoku jsou jeho minimální rozměry, menší energetické nároky a nižší ovlivnění skloviny z důvodu odtěkávání a koroze žáruvzdorných materiálů.

4.4 Výpočty potřebné pro návrh variant řešení

4.4.1 Přestup tepla v tavicím agregátu a orientační výpočet otopu agregátu

Ve sklářském agregátu probíhá sdílení tepla třemi klasickými mechanismy:

- ✓ sdílení tepla vedením (kondukcí)
- ✓ sdílení tepla prouděním (konvekcí)
- ✓ sdílení tepla sáláním (radiací)

Přesný výpočet spotřeby tepla v tavicím agregátu je poměrně komplikovaný, jelikož dochází k velmi složitému transportu energie a hmoty. Tepelný tok stěnou (tepelné ztráty) je dán vedením dle Fourierova zákona:

$$Q = -\lambda \cdot dt/dx \quad (1)$$

Pokud zanedbáme minoritní vlivy, lze pro hustotu tepelného toku využít rovnici vedení tepla stěnou, jak je uvedeno v [5]:

$$q = \lambda/S \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \quad (2)$$

Jelikož je koeficient tepelné vodivosti dán konstrukcí pece, bude pro zjednodušený výpočet použita empiricky získaná hodnota $Q_o' = 25 \text{ kW/m}^2$ [5].

Předpokládanou teplosměnnou plochu agregátu, při teoreticky válcovitém tvaru horní stavby o rozměrech $d = 1000 \text{ mm}$ a $v = 1000 \text{ mm}$, vypočítáme podle vztahu:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + v) = 4,712 \text{ m}^2 \quad (3)$$

Teoretická spotřeba energie na 1 kg utavené skloviny je podle [5] 0,9 kW. Teoretická potřeba energie na utavení požadovaného objemu skloviny je proto:

$$q_m = 0,9 \text{ kW} \cdot 120 \text{ kg} = 108 \text{ kW} \quad (4)$$

Při úvaze, že doba tavení při teplotě 1450°C , kdy potřebujeme max. výkon, trvá $t_p = 7$ hodin sestavíme dle [5] vzorec pro výpočet potřebného výkonu :

$$P_t = (q_m / t_p) + (Q_o' \cdot S) = 117,8 \text{ kWh} \quad (5)$$

Dále je nutné při dimenzování výkonu zohlednit účinnost jednotlivých způsobů otopu.

4.5 Shrnutí možností inovace MTA

Z poznatků získaných z literární a patentové rešerše vyplývá potřeba změny stávající konstrukce agregátu. Inovovaná konstrukce navrhovaného agregátu by měla, ve srovnání se stávajícím agregátem, splňovat zejména následující parametry:

- ✓ nízké investiční náklady
- ✓ nízké náklady na tavení
- ✓ kvalita utavené skloviny
- ✓ požadavky na bezpečnost a hygienu práce
- ✓ ekologické limity

Jedním z předpokladů dosažení příznivých ekonomických parametrů utavené skloviny je nalezení kompromisu mezi velikostí tělesa agregátu a technologickými požadavky. V ideálním případě by bylo vhodné zmenšit těleso pece tak, aby s nutným přídatkem (obeždění a tepelné izolace) opisovalo tavicí pánev. Toto tvrzení vychází z předpokladu, že zmenšením tělesa pece dojde ke zmenšení teplosměnné plochy a tím k zmenšení přestupu tepla do okolního prostředí.

Při návrhu konstrukce je také nutné minimalizovat možnost úniku tepla z agregátu přes netěsnosti v konstrukci. Předpokládá to minimalizaci stavebních otvorů a chlazených částí (vrata, vstup pro míchadlo, otvory pro termočlánky atd.) .

Vnitřní radiální zdivo agregátu, které je v přímém kontaktu s tavicí teplotou a na jehož povrchu probíhá v případě plynového otopu spalování, musí být z vysoce kvalitních materiálů. Jeho vnější stranu v prostoru mezi ocelovou konstrukcí je vhodné z tepelně izolačních důvodů obložit deskami či rohožemi z vláknitých izolačních materiálů.

5. NÁVRH ALTERNATIVNÍCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ MALÉHO TAVICÍHO AGREGÁTU

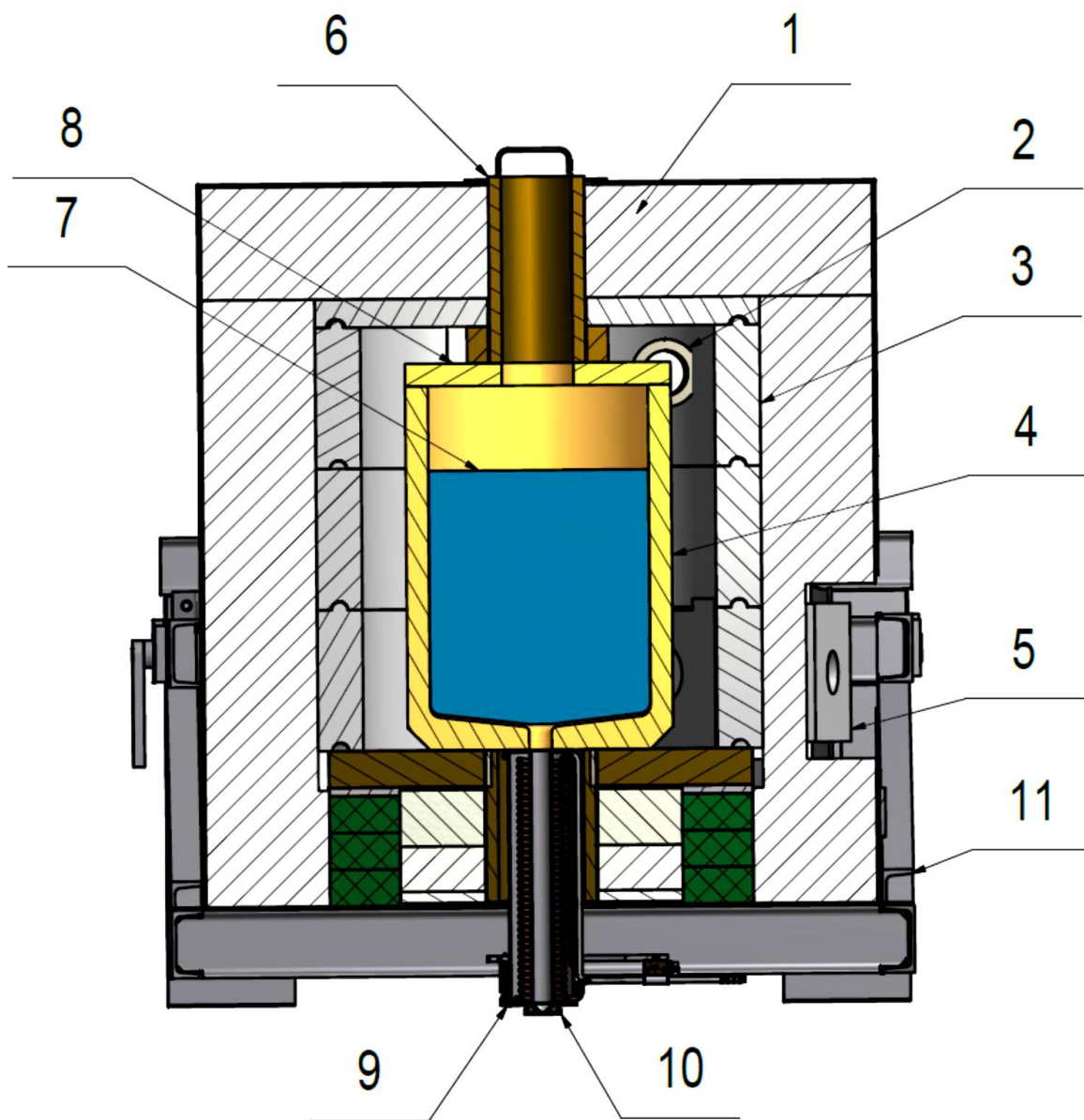
V této kapitole jsou na základě získaných poznatků, literární a patentové rešerše a provedených výpočtů navrženy varianty řešení inovovaného malého tavicího agregátu. Pomocí rozhodovací analýzy je v závěru vybrána optimální varianta pro podrobné konstrukční řešení.

5.1 Návrh variant řešení

5.1.1 Varianta A

Tato varianta využívá **plynového ohřevu** s tangenciálním prouděním spalín v prostoru okolo pánve. Potřebná teplota je dosažena spalováním směsi zemního plynu se vzduchem. Sklářská pánev 4, naplněná sklovinou 7, je usazena na podlaze tělesa tavicího agregátu. Je zakryta víkem 8 a obklopena kruhovým obezděním 3 z žárobetonových tvarovek. Mezi pánví a obezděním je prostor pro proudění spalín. Vnější stěna, tvořená plechovým krytím, je zaizolována vláknitou izolací 1, která snižuje ztráty tepla do okolního prostředí. Celé těleso agregátu je usazeno v rámu 11. Ohřev je zabezpečen jedním plynovým hořákem, který je umístěn v hořákové tvarovce 5. Spaliny proudící okolo pánve zabezpečují rovnoměrnou distribuci tepla a po jeho předání odcházejí z agregátu odtahovým otvorem 2.

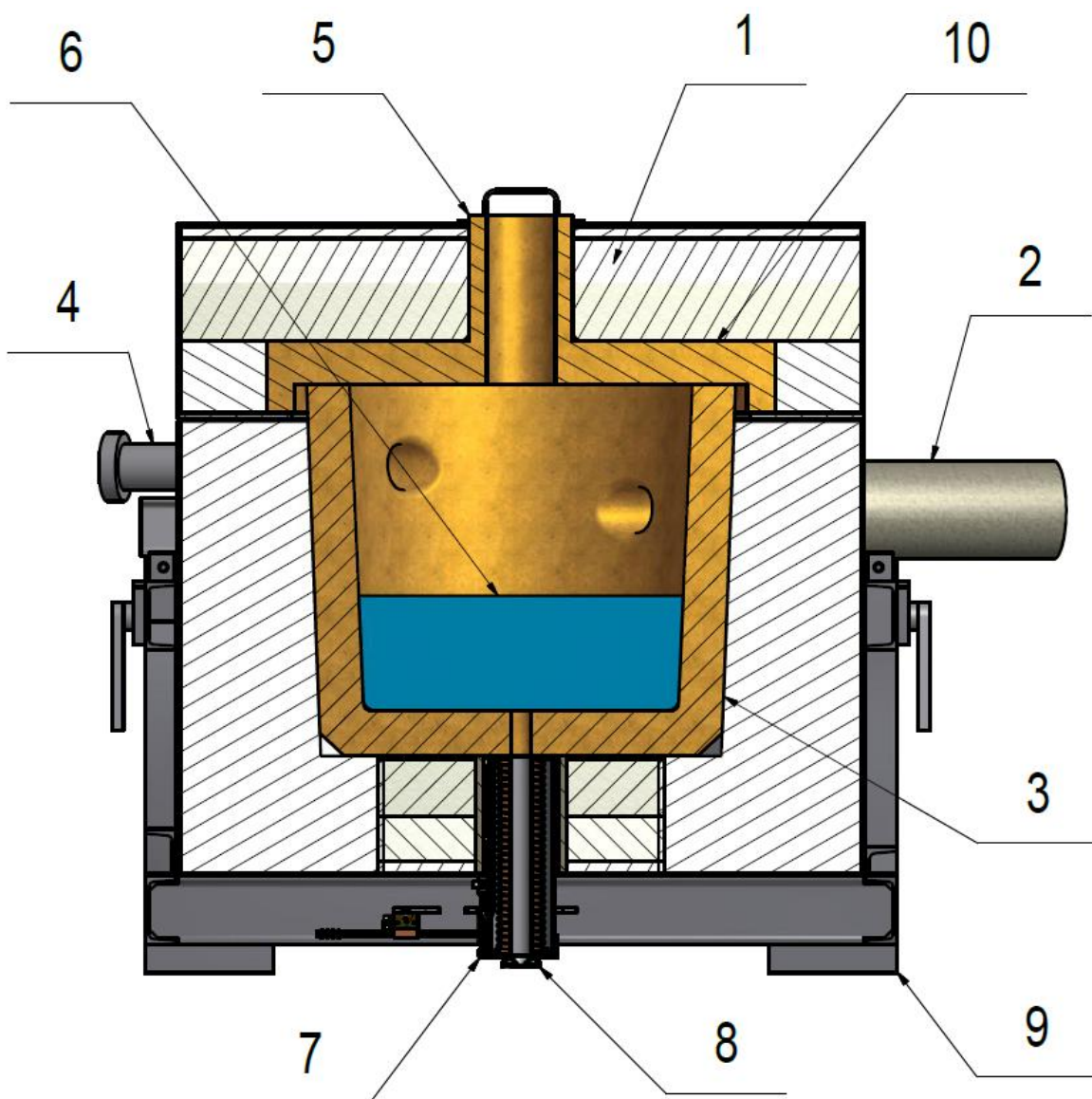
Sklářská vsázka je vsypávána otvorem v horní části agregátu 6. Rovnoměrná distribuce skloviny k tvarovacímu stroji je umožněna pomocí indukativně ohřívajícího výtoku 9. Vytékající pramínek skloviny je redukován výtokovou dýzou 10. Řez variantou A je znázorněn na obrázku č.7.



Obr.7 – Zjednodušený model varianty A (řez)

5.1.2 Varianta B

Tato varianta využívá **kyslíko - plynového ohřevu** s prouděním spalín nad hladinou skloviny v prostoru pánve. Potřebná teplota je dosažena spalováním směsi zemního plynu s kyslíkem. Sklářská pánev 3 je usazena na podlaze tělesa tavicího agregátu a zakryta víkem 10. Pánev je opatřena dvěma otvory, do kterých jsou vloženy keramické trubky.

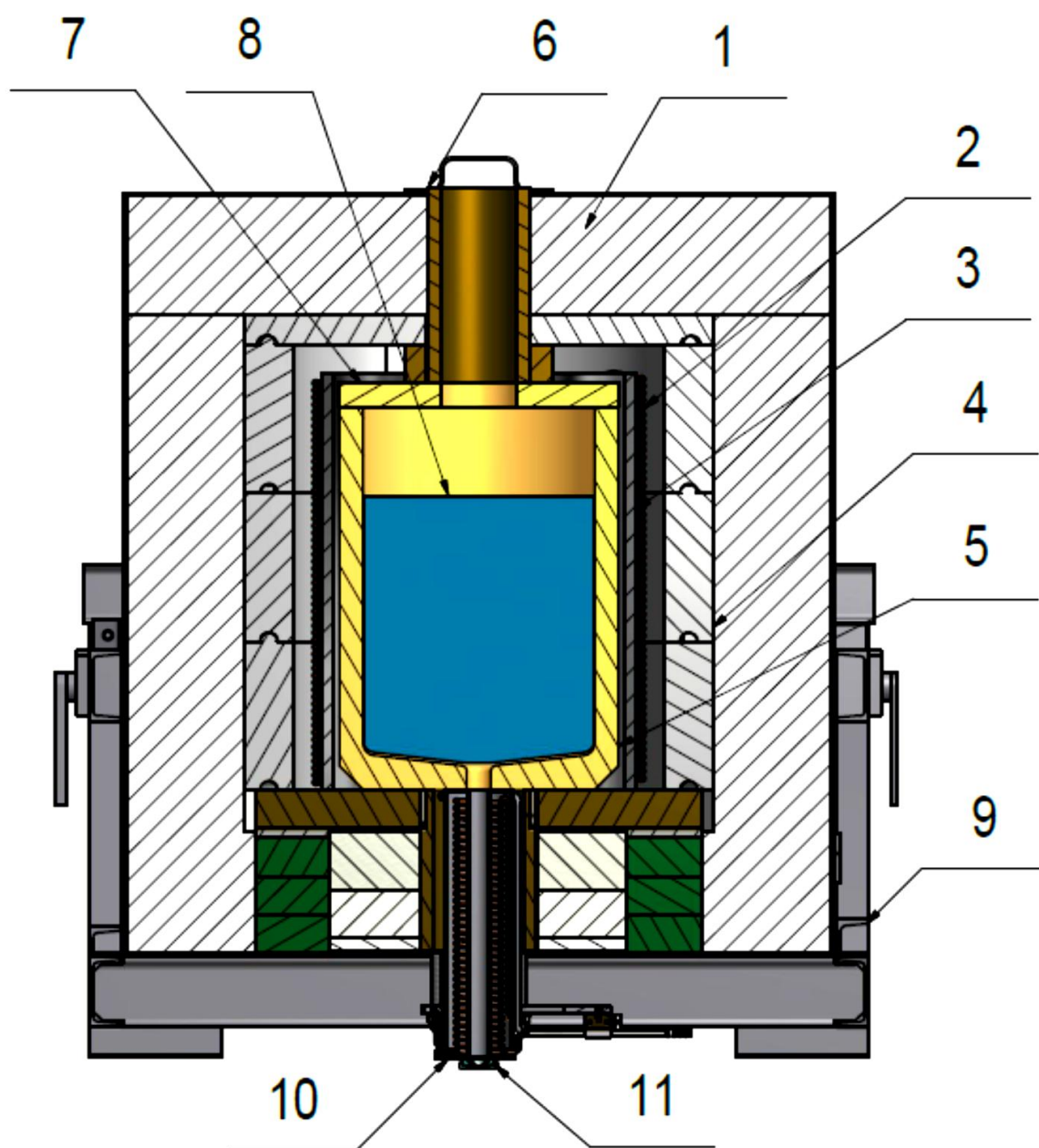


Obr.8 – Zjednodušený model varianty B (řez)

V jedné je umístěna hořáková tvarovka osazená speciálním, kyslíko-plynovým hořákem 4. Spaliny, kterých je oproti plynovému otopu 5x méně, proudí nad hladinou skloviny 6 a poté jsou odtaženy odtahovým otvorem 2. Většina tepla je předávána radiací. Vnější stěna pánve je zaizolována vláknitou izolací 1, která snižuje ztráty tepla do okolního prostředí. Celé těleso agregátu je usazeno v rámu 9. Sklářská vsázka je vsypávána otvorem v horní části agregátu 5. Rovnoměrná distribuce skloviny k tvarovacímu stroji je umožněna pomocí indukčně otápěného výtoku 7. Vytékající pramínek skloviny je redukován výtokovou dýzou 8. Řez variantou B je znázorněn na obrázku č.8.

5.1.3 Varianta C

Tato varianta využívá **elektrického induktivního ohřevu**. Potřebná teplota je dosažena průchodem magnetického pole vodivým materiálem, v tomto případě karbidem křemíku. Sklářská pánev 5, naplněná sklovinou 8, je usazena na podlaze tělesa tavicího agregátu a je zakryta víkem 7. Pánev je vložena do tvarovky z materiálu SiC 3, který je obklopen měděným induktorem 2 připojeným na středofrekvenční generátor.



Obr.9 – Zjednodušený model varianty C (řez)

Induktor pomocí vířivých proudů magnetického pole ohřívá stěnu SiC tvarovky a zabezpečuje její udržování na požadované teplotě. Tím je ohřívána i sklářská pánev a sklovina v ní. Vnější stěna je opět zaizolována vláknitou izolací 1 a usazena v rámu 9. Sklářská vsázka je vsypávána otvorem v horní části agregátu 6. Rovnoměrná distribuce skloviny k tvarovacímu stroji je umožněna pomocí induktivně otápeného výtoku 10. Vytékající pramínek skloviny je redukován výtokovou dýzou 11. Řez variantou C je znázorněn na obrázku č.9.

5.2 Výběr varianty pro konstrukční řešení

5.2.1 Stanovení rozhodovacích kritérií

Pro volbu vhodného řešení malého tavicího agregátu byla použita rozhodovací analýza. Pro analýzu byla v souladu s identifikovanými inovačními příležitostmi zvolena tato kritéria:

- ✓ **Nároky na podlahovou plochu** – z pohledu provozovatele zařízení je důležitý údaj kolik kg skloviny utaví v prostoru hutní haly, který má k dispozici. Vypočtená hodnota má významný vliv při rozpočtu režijních nákladů do množství utaveného skla a je významným parametrem při stanovení nákladové ceny.
- ✓ **Hmotnost zařízení** – posuzuje hmotnost zařízení vzhledem k umístění, případné manipulaci i požadavku na nosnost stavební konstrukce.
- ✓ **Náklady na pořízení agregátu** – pořizovací náklady jsou rozhodujícím ekonomickým parametrem pro stanovení nákladové ceny výrobku.
- ✓ **Provozní náklady** – souhrn předpokládaných nákladů na opravy agregátu.
- ✓ **Energetická náročnost** – náklady agregátu na provozní energii přepočtené na kilogram utavené skloviny, parametr zohledňuje účinnost zvoleného otopu.
- ✓ **Výtěžnost z utavené skloviny** – množství skloviny, které vstupuje do tvarovacího stroje, v porovnání s množstvím vsázky.
- ✓ **Možnost regulace otopu** – parametr zohledňující možnosti regulace otopu.
- ✓ **Ovlivnění skloviny topným médiem** – parametr posuzuje vhodnost otopu pro různé tavené skloviny (odtékávání, vypalování, ovlivnění redox stavu atd.).

- ✓ **Nároky na kvalifikaci obsluhy** – parametr vyjadřuje náročnost obsluhy agregátu a jeho nároky na kvalifikaci obslužného personálu.
- ✓ **Bezpečnost práce** – posouzení zařízení z pohledu bezpečnosti práce.
- ✓ **Vliv na životní prostředí** – posouzení zařízení z hlediska vlivu na životní prostředí.
- ✓ **Životnost zařízení** – předpokládaná životnost zařízení do střední, případně do celkové opravy.
- ✓ **Komfort regulace výtoku skloviny** – parametr zohledňující rychlost a přesnost regulace teploty skloviny na výtoku tavicího agregátu.

5.2.2 Stanovení váhy rozhodovacích kritérií

Vzhledem k problematičnosti posuzování tak velkého počtu kritérií současně byla využita metoda párového srovnání kritérií vyhodnocená pomocí Fullerova trojúhelníku. Všechna kritéria jsou porovnána mezi sebou, preferovaná volba se vepíše do tabulky a zjišťuje se počet získaných preferencí. Postup hodnocení je patrný z tabulky č.1.

Párové hodnocení kritérií													
Kritérium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 nároky na podlahovou plochu		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2 hmotnost zařízení	1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3 náklady na pořízení	3	3		4	5	6	3	8	3	10	11	3	3
4 provozní náklady	4	4	4		4	6	4	4	4	10	11	4	4
5 energetická náročnost	5	5	5	4		6	5	5	5	10	11	12	5
6 výtěžnost z US	6	6	6	6	6		6	6	6	10	11	12	6
7 možnost regulace otopu	7	7	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13
8 ovlivnění skloviny topným médiem	8	8	8	4	5	6	8		8	10	11	12	8
9 nároky na kvalifikaci obsluhy	9	9	3	4	5	6	9	8		10	11	12	13
10 bezpečnost práce	10	10	10	10	10	10	10	10	10		10	10	10
11 vliv na životní prostředí	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10		12	13
12 životnost zařízení	12	12	3	4	12	12	12	12	12	10	12		12
13 komfort regulace výtoku skloviny	13	13	3	4	5	6	13	8	13	10	13	12	

Tabulka č.1 – Párové hodnocení kritérií

Na základě párového hodnocení byla stanovena váha jednotlivých kritérií pro účely rozhodovací analýzy. Váhy kritérií vyplývají z následujícího vztahu:

$$v_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^k p_i} \quad \text{kde } p_i \text{ je } i\text{-té kritérium} \quad (6)$$

Aplikováním vzorce na hodnoty počtu preferencí jsou získány váhy jednotlivých kritérií. Ty jsou číselně vyjádřeny v tabulce č.2.

Stanovení váhy kritérií			
Kritérium		Počet preferovaných	Váha
1	nároky na podlahovou plochu	1	1,28%
2	hmotnost zařízení	0	0,00%
3	náklady na pořízení	6	7,69%
4	provozní náklady	9	11,54%
5	energetická náročnost	7	8,97%
6	výtěžnost z US	9	11,54%
7	možnost regulace otopu	2	2,56%
8	ovlivnění skloviny topným médiem	6	7,69%
9	nároky na kvalifikaci obsluhy	3	3,85%
10	bezpečnost práce	12	15,38%
11	vliv na životní prostředí	9	11,54%
12	životnost zařízení	9	11,54%
13	komfort regulace výtoku skloviny	5	6,41%

Tabulka č.2 – Stanovení váhy kritérií

5.2.3 Matice využitelnosti

V závěru byla vytvořena matice využitelnosti, ve které byla uplatněna váha jednotlivých kritérií. Souhrnné výsledky rozhodovací analýzy jsou uvedeny v tabulce č.3 na straně 37 této práce. Navržené varianty řešení jsou označeny v tabulce velkými písmeny shodně s označením v kapitole 5.1 - návrh variant řešení.

Varianta A

- varianta plynového ohřevu s tangenciálním prouděním spalín v prostoru okolo pánve

Varianta B

- varianta kyslíko - plynového ohřevu s prouděním spalín nad hladinou skloviny v prostoru pánve

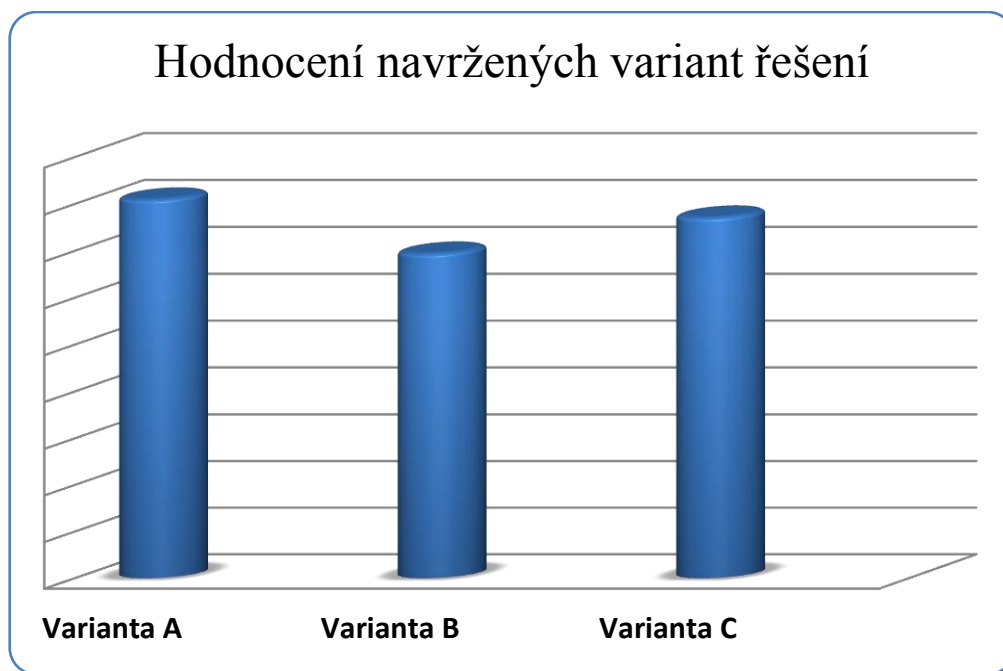
Varianta C

- varianta elektrického indukčního ohřevu

Kritérium			Pořadí významnosti	Váha	Matice využitelnosti variant					
					A		B		C	
Poř. č.		Název kritéria			Hodnota		Hodnota		Hodnota	
					P	V	P	V	P	V
1	↓	nároky na podlahovou plochu	12.	1,28%	3	0,04	3	0,04	3	0,04
2	↓	hmotnost zařízení	13.	0,00%	2	0,00	2	0,00	3	0,00
3	↓	náklady na pořízení	7. - 8.	7,69%	4	0,31	3	0,23	2	0,15
4	↓	provozní náklady	2. - 5.	11,54%	4	0,46	4	0,46	3	0,35
5	↓	energetická náročnost	6.	8,97%	3	0,27	3	0,27	4	0,36
6	↑	výtěžnost z US	2. - 5.	11,54%	4	0,46	2	0,23	3	0,35
7	↑	možnost regulace otopu	11.	2,56%	3	0,08	3	0,08	4	0,10
8	↓	ovlivnění skloviny topným médiem	7. - 8.	7,69%	5	0,38	2	0,15	5	0,38
9	↓	nároky na kvalifikaci obsluhy	10.	3,85%	5	0,19	4	0,15	4	0,15
10	↑	bezpečnost práce	1.	15,38%	4	0,62	4	0,62	4	0,62
11	↓	vliv na životní prostředí	2. - 5.	11,54%	4	0,46	5	0,58	5	0,58
12	↑	životnost zařízení	2. - 5.	11,54%	4	0,46	3	0,35	4	0,46
13	↑	komfort regulace výtoku skloviny	9.	6,41%	5	0,32	5	0,32	5	0,32
Celkem :					4,05		3,47		3,86	
Užitkovost v relativním vyjádření (%):					81		69		77	
Pořadí variant dle kritériálního hodnocení:					1		3		2	

Tabulka č.3 – Rozhodovací analýza využitelnosti variant

Výsledky rozhodovací analýzy mezi třemi navrženými variantami řešení dle výše uvedených kritérií jsou patrné z grafu č.1. Na ose Y je vyneseno počet bodů získaných v matici využitelnosti jednotlivých variant.



Graf č.1 – Výsledky rozhodovací analýzy

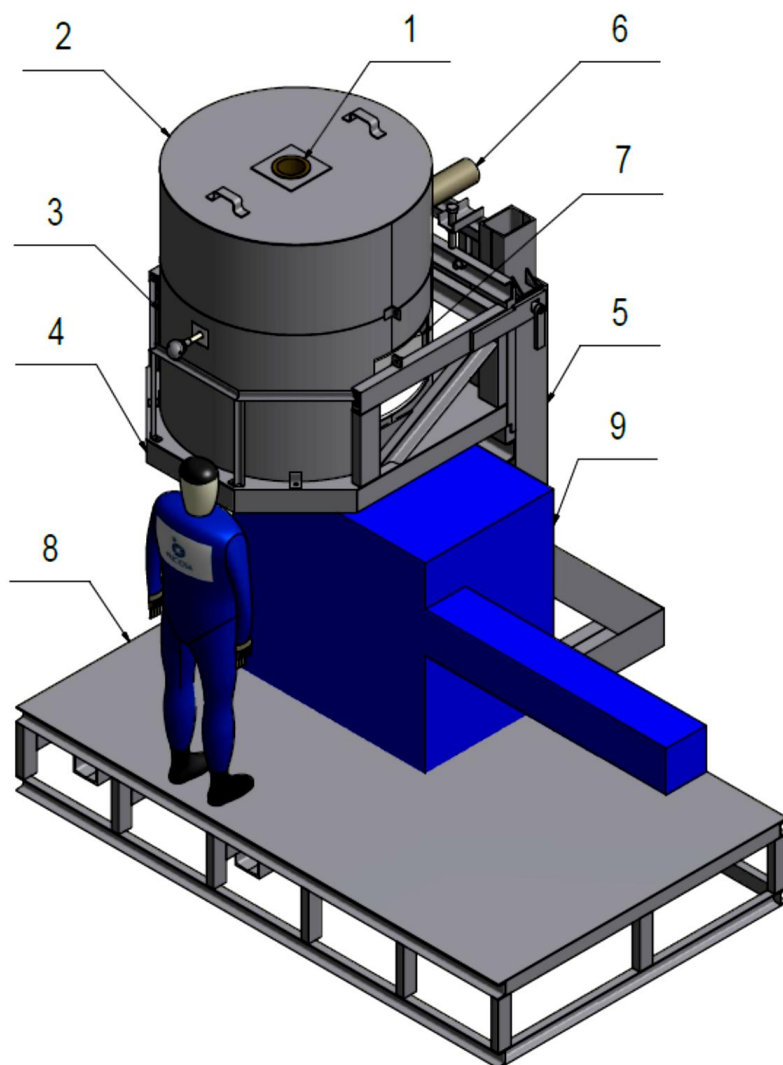
Na základě výsledků rozhodovací analýzy byla pro další konstrukční řešení vybrána **varianta A**.

6. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZVOLENÉ VARIANTY

V této kapitole je popsáno konstrukční řešení vybrané varianty při jehož návrhu jsou uplatněny metody DFX. V závěru kapitoly je konstrukční návrh prověřen pomocí analytické metody FMEA.

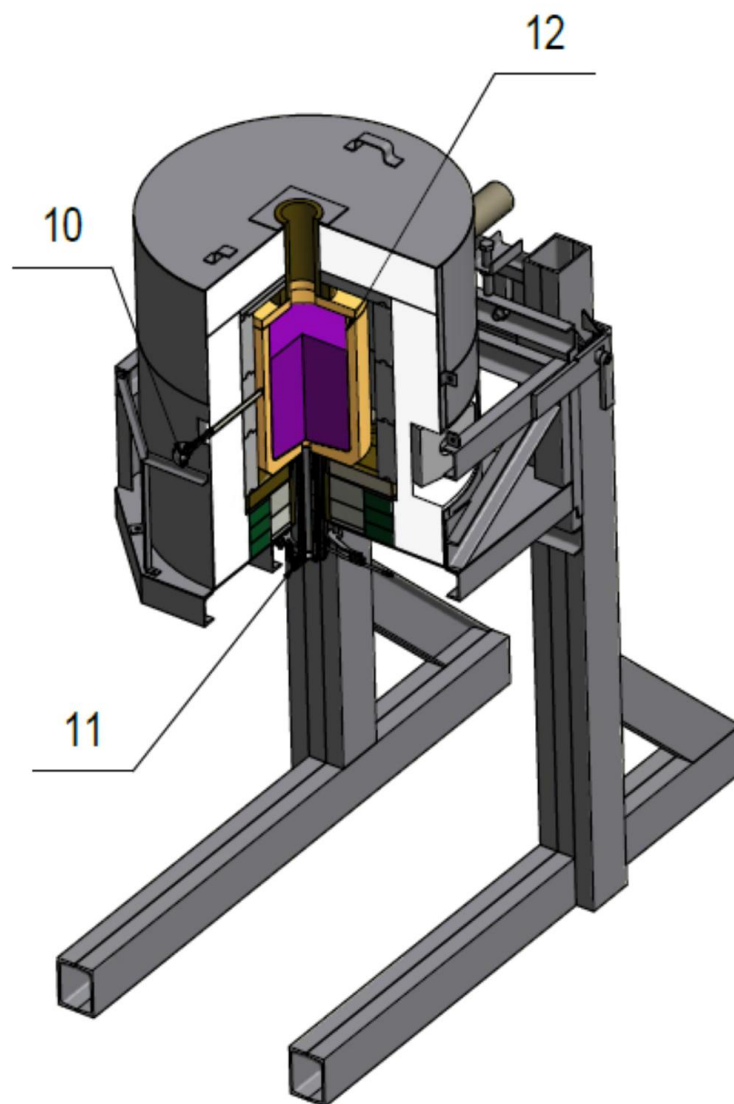
6.1 Konstrukční řešení

V souladu se zadáním diplomové práce je navržena inovace malého pánvového tavicího agregátu jehož jednotlivé části jsou patrné z obrázků č.10, č.11 a č.12.



Obr.10 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (celkový pohled)

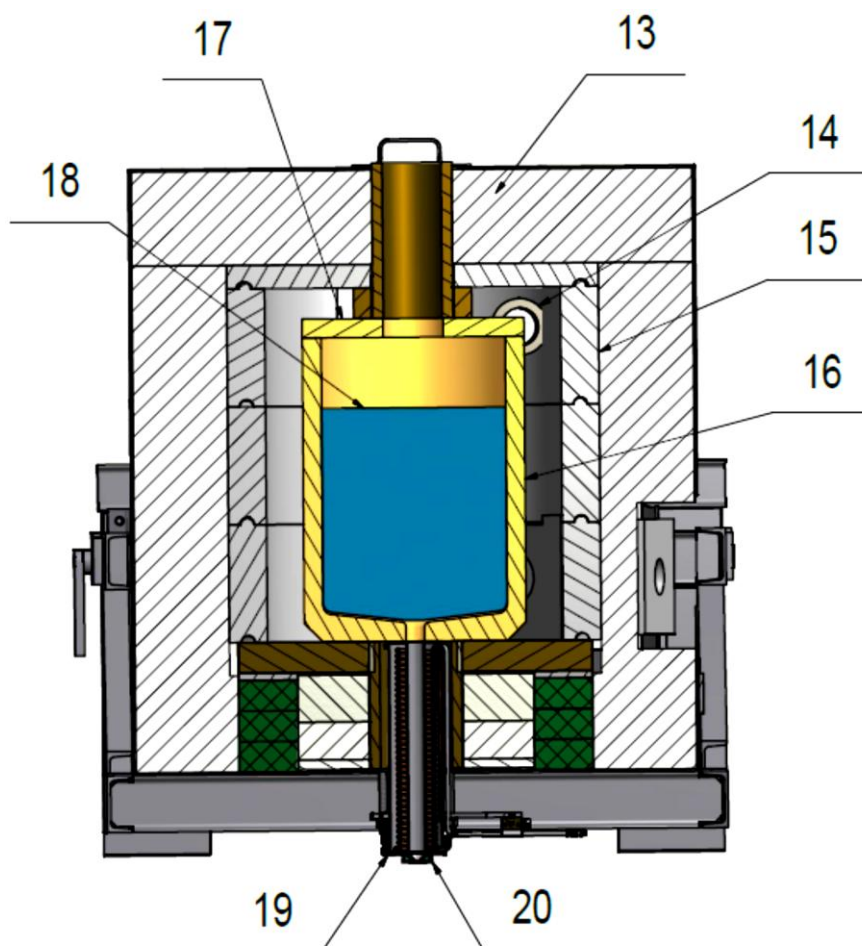
Vlastní těleso agregátu se skládá ze spodní 3 a horní 2 stavby, která je opatřena otvorem pro zakládání vsázky 1. Spodní stavba je opatřena hořákovou tvarovkou 7 a otvorem pro odtah spalin 6. Vlastní těleso agregátu je nesené závěsnou konzolí 4, která je upevněna na základním rámu 5. Správné umístění tvarovacího stroje 9 zajišťuje pracovní pódium 8.



Obr.11 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (tříčtvrtinový řez tavicí částí)

Součástí agregátu je termočlánek 10, který slouží k měření a regulaci teploty ve spalovacím prostoru agregátu 12. Transport skloviny k tvarovacímu stroji zajišťuje induktivně ohřívávací spodní výtok 11, ten je přisazený přímo k vnější straně dna pánve.

Konstrukce tělesa agregátu je velmi kompaktní. Vzhledem k absenci spodní stavby a výtokového feedru se podařilo snížit požadavky na zastavěnou plochu pracoviště o 6 m². To může mít významný pozitivní dopad v případě budoucí potřeby většího počtu malých tavicích agregátů v jedné lokalitě.



Obr.12 – Navržený inovovaný malý tavicí agregát (řez tavicí částí)

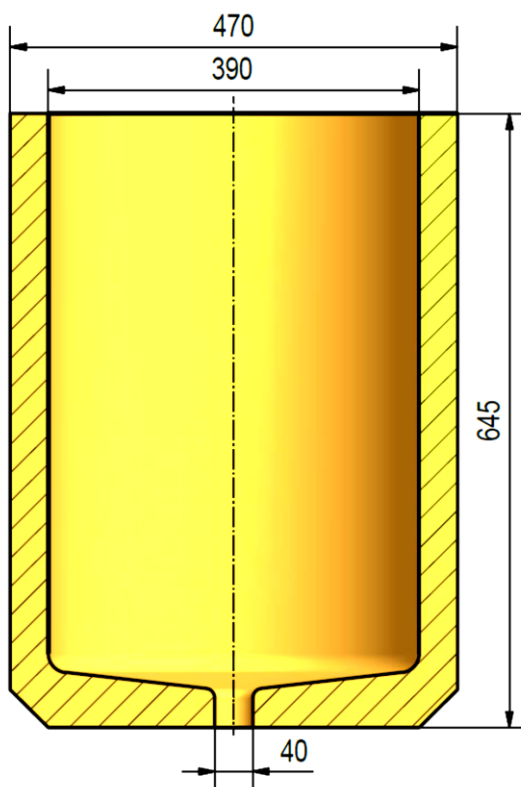
Hlavní část tavicího prostoru agregátu zaujímá sklářská pánev 16, naplněná sklovinou 18. Ta je usazena na podlaze tělesa tavicího agregátu. Je zakryta víkem 17 a obklopena radiálním obezděním 15 z žárobetonových tvarovek. Mezi pánví a obezděním je prostor pro proudění spalin. Vnější stěna, tvořená plechovým krytím, je zaizolována vláknitou izolací 13, která snižuje ztráty tepla do okolního prostředí. Spaliny proudící okolo pánve zabezpečují rovnoměrnou distribuci tepla a po jeho předání odcházejí z agregátu odtahovým otvorem 14.

Rovnoměrná distribuce skloviny k tvarovacímu stroji je umožněna pomocí induktivně ohřívání výtoku 19. Vytékající pramínek skloviny je redukován výtokovou dýzou 20.

6.2 Návrh keramických komponent

6.2.1 Tavicí pánev

Pánev je základní částí každého periodicky pracujícího tavicího agregátu. Na vlastnosti pánve jsou z hlediska technologie tavení kladeny vysoké nároky, neboť kvalita utavené skloviny a kvalita pánve spolu velmi úzce souvisí. Pro inovovaný MTA byla navržena pánev z hlinito-křemičito-zirkoničitého materiálu Z20-C, maďarské firmy Refmon. Tato keramika obsahuje 66% Al_2O_3 , 21% ZrO_2 , 12% SiO_2 a 1% příměsí. Pánev je v oblasti dna opatřena osově umístěným otvorem o průměru 40 mm pro vypouštění skloviny. Tvar a rozměry pánve jsou patrné z obrázku č.13.



Obr.13 – Řez pánví malého tavicího agregátu

Klíčové vlastnosti keramického materiálu jsou převzaty z technického listu výrobce:

✓	pevnost v tlaku	85 N.mm ⁻² ;
✓	délková teplotní roztažnost	0,7 %;
✓	specifická hmotnost	2,9 kg.dm ⁻³ ;
✓	pórovitost	22 %;
✓	pracovní teplota	1650°C;

Návrh velikosti pánve v litrech vychází z požadovaného množství utavené skloviny. Následující kontrolní výpočet ověřuje vhodnost zvolené velikosti pánve tak, jak je uvedeno v dostupné literatuře [5].

Vstupní hodnoty:

✓	požadované množství vypracované skloviny	$m_{sk} = 150 \text{ kg};$
✓	měrná hmotnost skloviny (Na-K)	$\rho_{sk} = 2,56 \text{ kg.dm}^{-3};$
✓	koeficient využití pánve	$\eta = 100 \text{ %};$

Požadovaná velikost pánve:

$$V_{po} = \frac{m_{sk} \cdot 100}{\rho_{sk} \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 100}{2,56 \cdot 100} = 58,6 \text{ dm}^3 \quad (7)$$

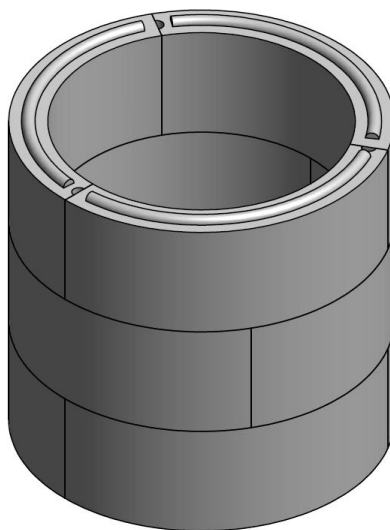
Skutečná velikost pánve:

$$V_{sku} = \pi \cdot r^2 \cdot v = 3,14 \cdot 1,95^2 \cdot 6 = 71,7 \text{ dm}^3 \quad (8)$$

Při tavbě dochází k tvorbě pěny z rozkladných reakcí vsázky a z tohoto důvodu nemůže být pánev sklovinou naplněna až po okraj. Vzdálenost mezi horním okrajem pánve a hladinou skloviny je 110 mm a tak lze konstatovat, že velikost pánve je zvolena vhodně.

6.2.2 Vnitřní radiální vyzdívka

Vnitřní vyzdívka je navržena z vysoce hlinitého bezcementového žárobetonu SUPRABET 1800-TSCR dodávaného firmou Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí. Tato keramika obsahuje 85% Al₂O₃, 9,5% MgO, 2% Cr₂O₃ a 1,5% Fe₂O₃. V konstrukci jsou využity speciální tvarovky, které jsou opatřeny zámkem a dají se navzájem dobře vázat. Uspořádání radiálního zdiva je patrné z obrázku č.14.



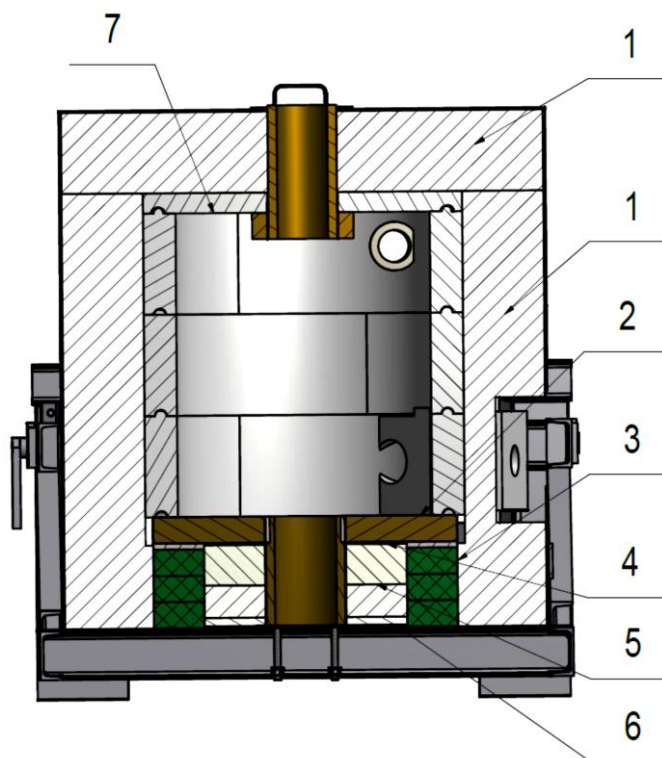
Obr.14 – Sestava radiálního zdiva tavicího prostoru

Klíčové vlastnosti keramického materiálu jsou převzaty z technického listu výrobce:

✓	pevnost v tlaku	100 MPa;
✓	délková teplotní roztažnost	0,6 %;
✓	specifická hmotnost	2,97 kg.dm ⁻³ ;
✓	pórovitost	17 %;
✓	pracovní teplota	1800°C;

6.3 Návrh a skladba izolačních materiálů

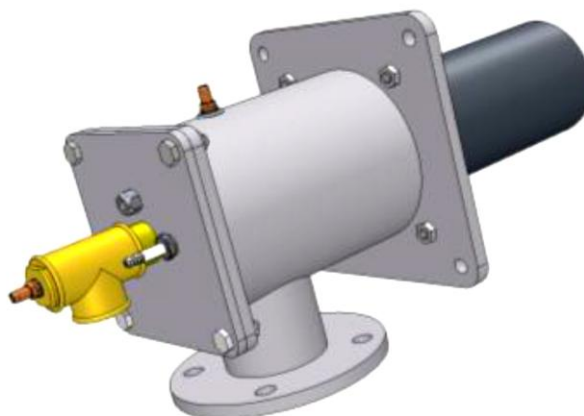
Pánev a vnitřní radiální zdivo jsou usazeny na pevných izolačních deskách ze silimanitového materiálu šamot A60S českého výrobce PD Refraktories 2. Tento materiál je využit především pro své výborné žáruvzdorné vlastnosti, minimální délkovou teplotní roztažnost a dobrou pevnost v tlaku. Desky jsou položeny na izolačních tvárnících Trizol HB11 od fy. Refrasil 3. Pro ostatní tepelnou izolaci, na kterou nejsou kladeny žádné dodatečné pevnostní požadavky, jsou využity výrobky firmy Promat. K izolaci dna je použit materiál Promaform 1430 4, Promasil 1100 5 a Promalight 330 6. Prostor mezi radiálním zdivem 7 a vnější stěnou agregátu je vyplněn vláknitou izolací Promasil 1100 1. Skladba izolace je patrná z obrázku č.15.



Obr.15 – Skladba tepelně-izolačních materiálů malého tavicího agregátu

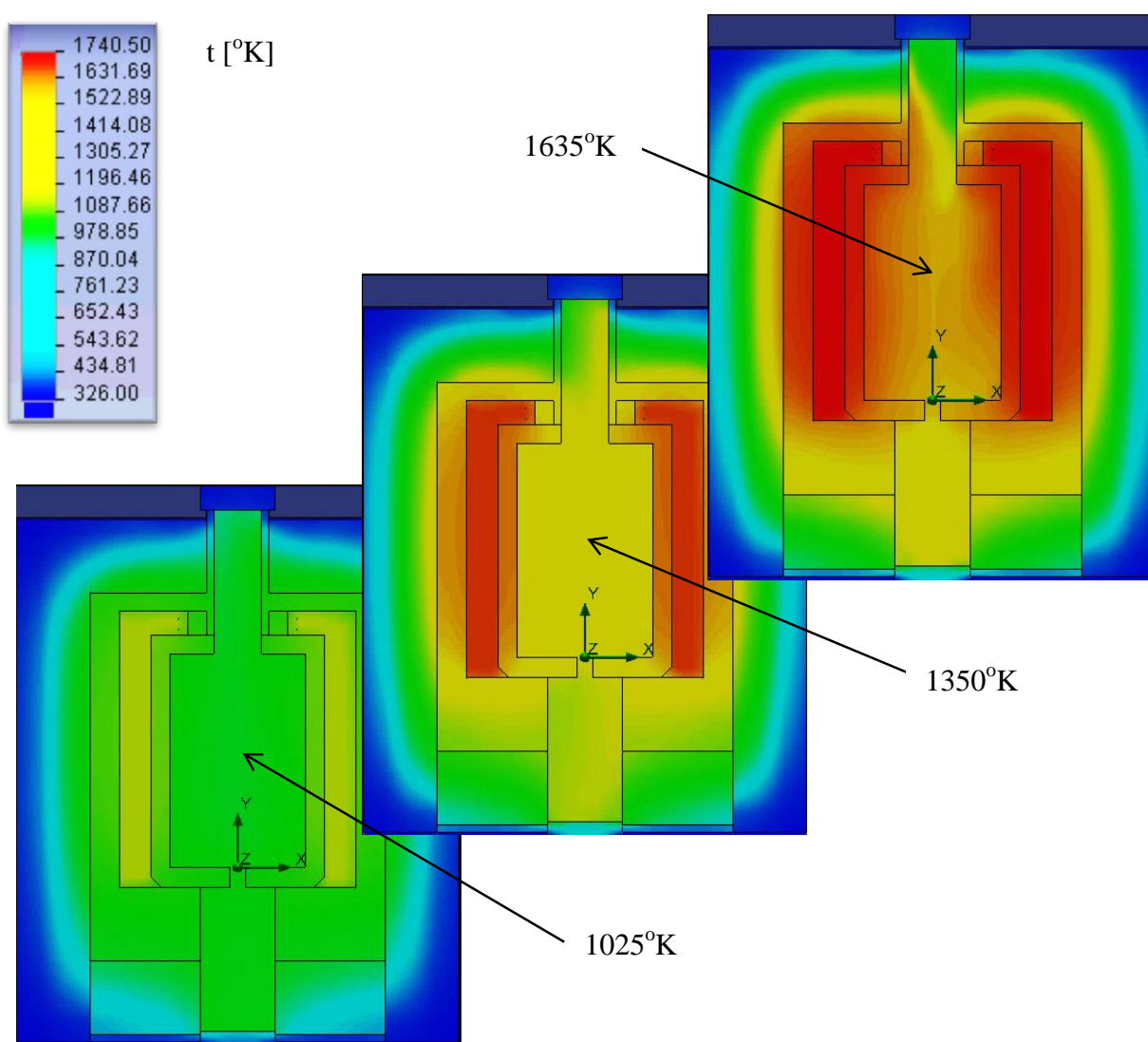
6.4 Návrh způsobu ohřevu pro MTA

Vyrovnané teplotní pole vytváří v prostoru pánve příznivé podmínky pro protavení vsázky, dokonalé odplynění skloviny a omezení možnosti vzniku šlír. Vyrovnanost teplotních gradientů a nižší tavicí teploty jsou primárním předpokladem pro docílení dobré kvality skloviny. S ohledem na tento fakt byl navržen otop MTA tangenciálním způsobem jedním nízkotlakým vířivým hořákem, situovaným v oblasti dna pánve. Je navržen hořák o výkonu 150 kW s regulovatelností 1:10 jehož model ukazuje obrázek č.16. Výkon hořáku vychází z výpočtu v kapitole 4.4.1.



Obr.16 – Model hořáku s keramickým spalovacím kanálem [4]

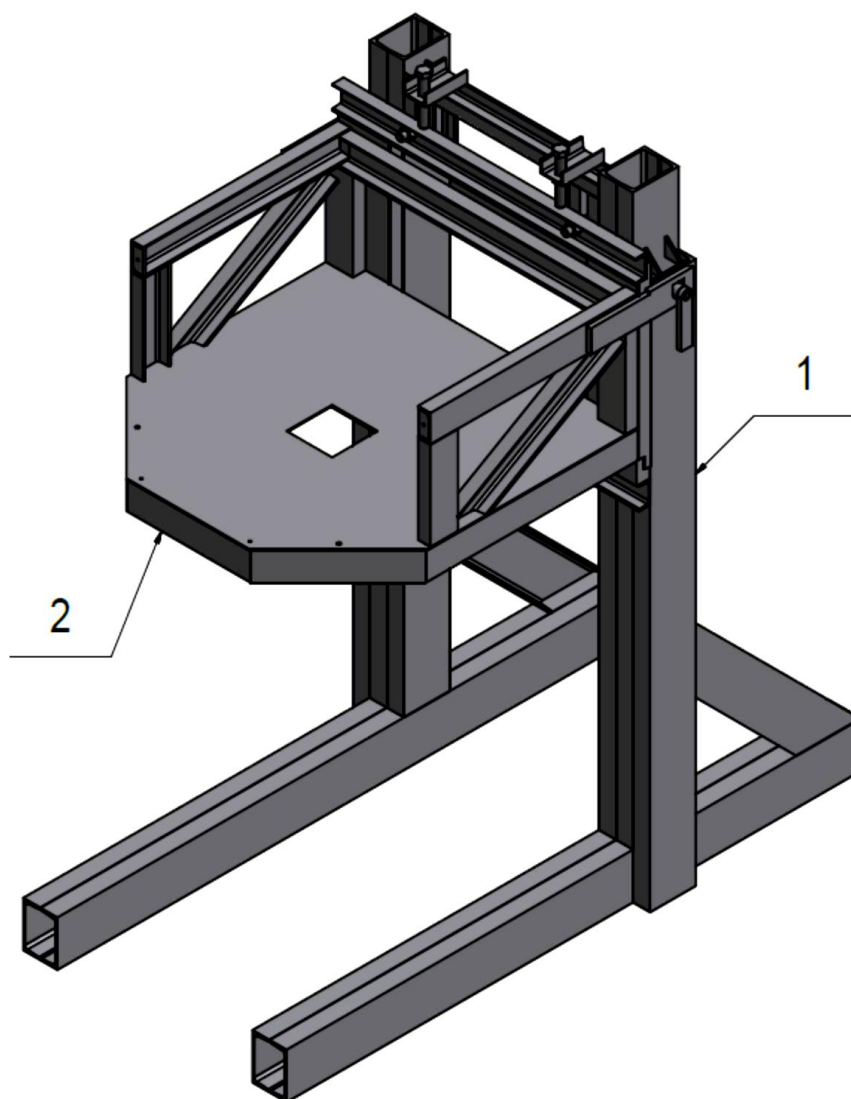
Spalovací prostor je geometricky přizpůsoben tangenciálnímu otopu tak, aby byl plamen z hořáků směřován od pánve k radiální vyzdívce vnitřního tavicího prostoru agregátu. Větší teplosměnná plocha bočního zdiva, na které probíhá kontaktní spalování, tak předá více sálavého tepla bočním stěnám pánve. Vedení spalin v prostoru agregátu je řízeno tak, aby bylo docíleno obtékání pánve spalinami ve vertikálním směru. Rozložení teplotního pole při ohřevu na tavicí teplotu bylo namodelované v Autodesk Simulation CFD, programu fy. Autodesk, a je patrné z obrázku č.17.



Obr.17 – Model vývoje teplotního pole inovovaného MTA při ohřevu na tavicí teplotu.

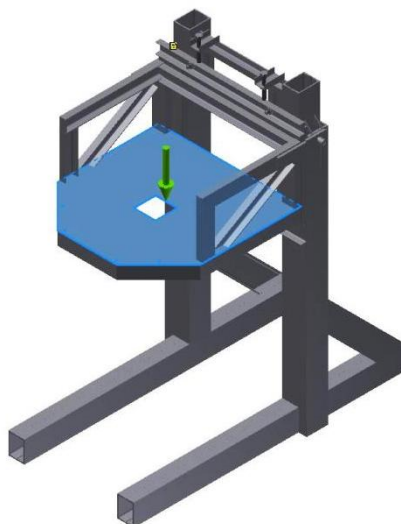
6.5 Návrh a výpočet ocelové konstrukce

Navržená ocelová konstrukce se skládá z hlavního rámu 1 a odnímatelné konzole 2 jak je patrné z obrázku č.18. Je vyhotovena z tyčí průřezu U válcovaných za tepla zhotovených dle DIN 1026-1. Hlavní rám agregátu nahrazuje funkci spodní stavby pece a slouží k vynesení vlastního tělesa agregátu do potřebné výšky. Na odnímatelné konzole je umístěna tavicí část agregátu. Vzhledem k potřebě budoucích oprav tělesa agregátu mimo prostory hutní haly je konzola uzpůsobena k snadnému sejmutí z hlavního rámu a převozu do servisních prostor pomocí manipulační techniky.



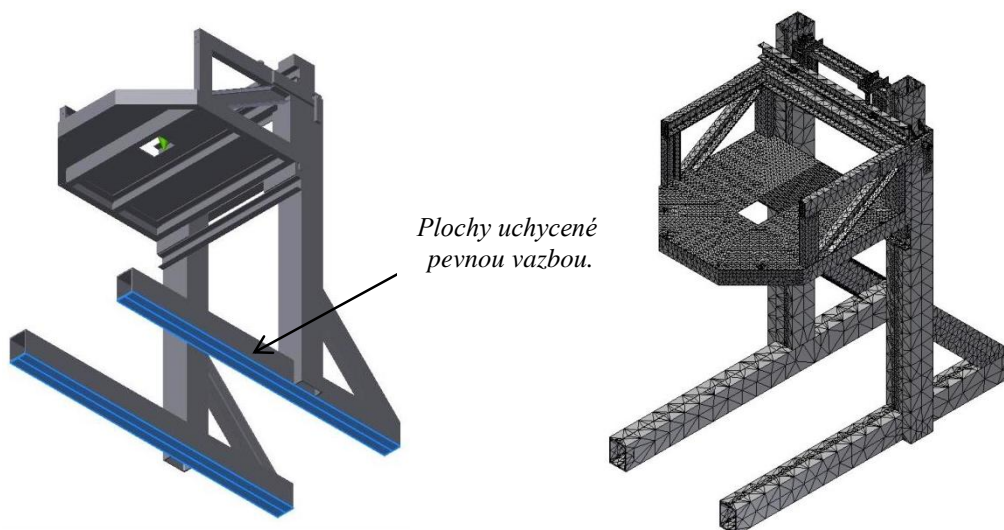
Obr.18 – Ocelová konstrukce inovovaného malého tavicího agregátu

Nosnost ocelové konstrukce je dimenzována na zatížení plochy konzole spojitým zatížením 1000 kg na m². Směr působení zatížení a zatížená plocha jsou patrné z obrázku č.19.



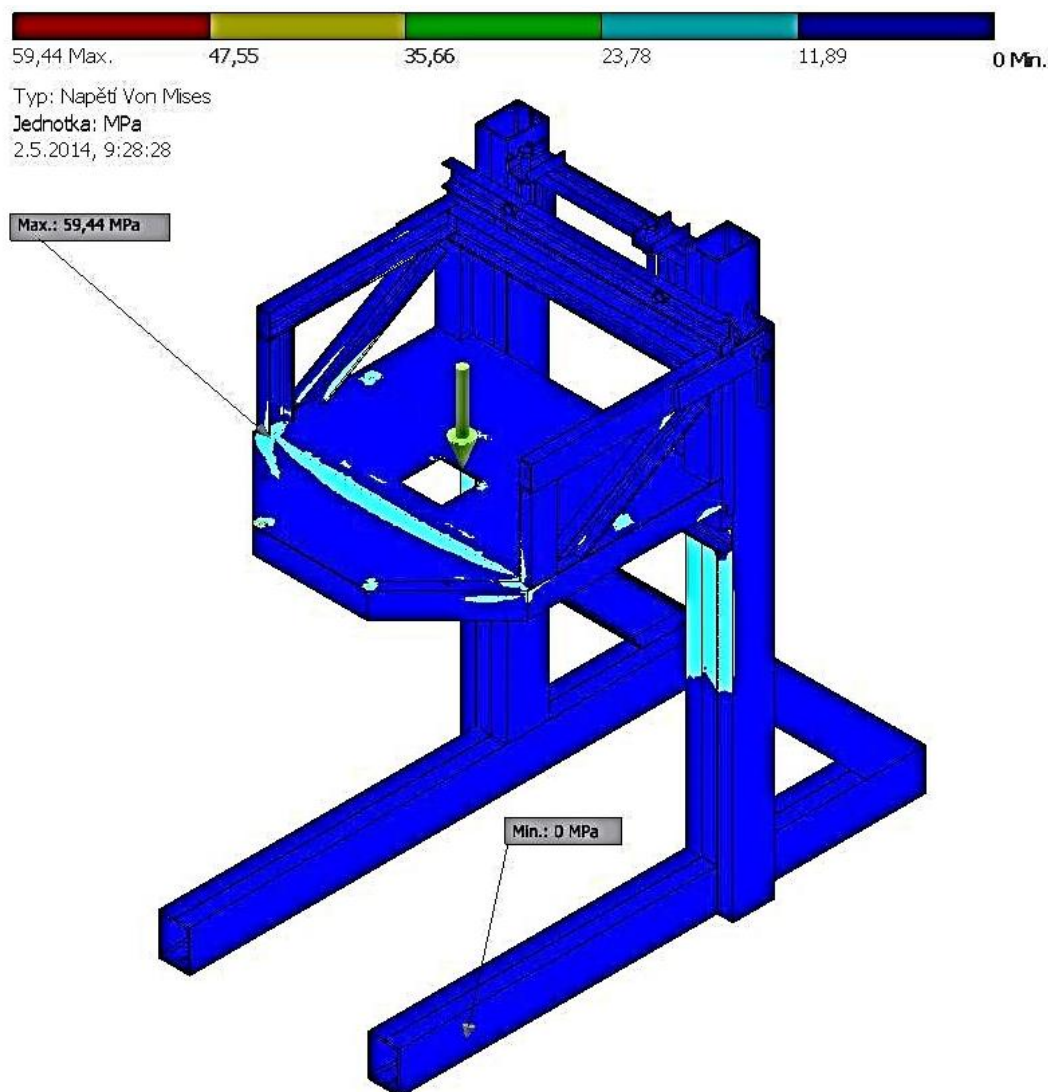
Obr.19 – Směr a plocha působení spojitého zatížení konzole

Výsledný návrh byl přezkoumán pomocí pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor Professional. Nejprve byl v rámci nastavení parametrů pevnostní analýzy hlavní rám ukotven pevnou vazbou k podlaze a poté byla vytvořena síť prvků a uzlů potřebných pro výpočet. To názorně ukazuje obrázek č.20.



Obr.20 – Ukotvené plochy hlavního rámu a návrh sítě pro další výpočet

Výsledek rozložení průběhu napětí podle hypotézy HMH (Huber, Mises, Hencky) je znázorněn na obrázku č.21. Z provedené simulace vyplývá, že maximální hodnota redukovaného napětí je 59,44 MPa.

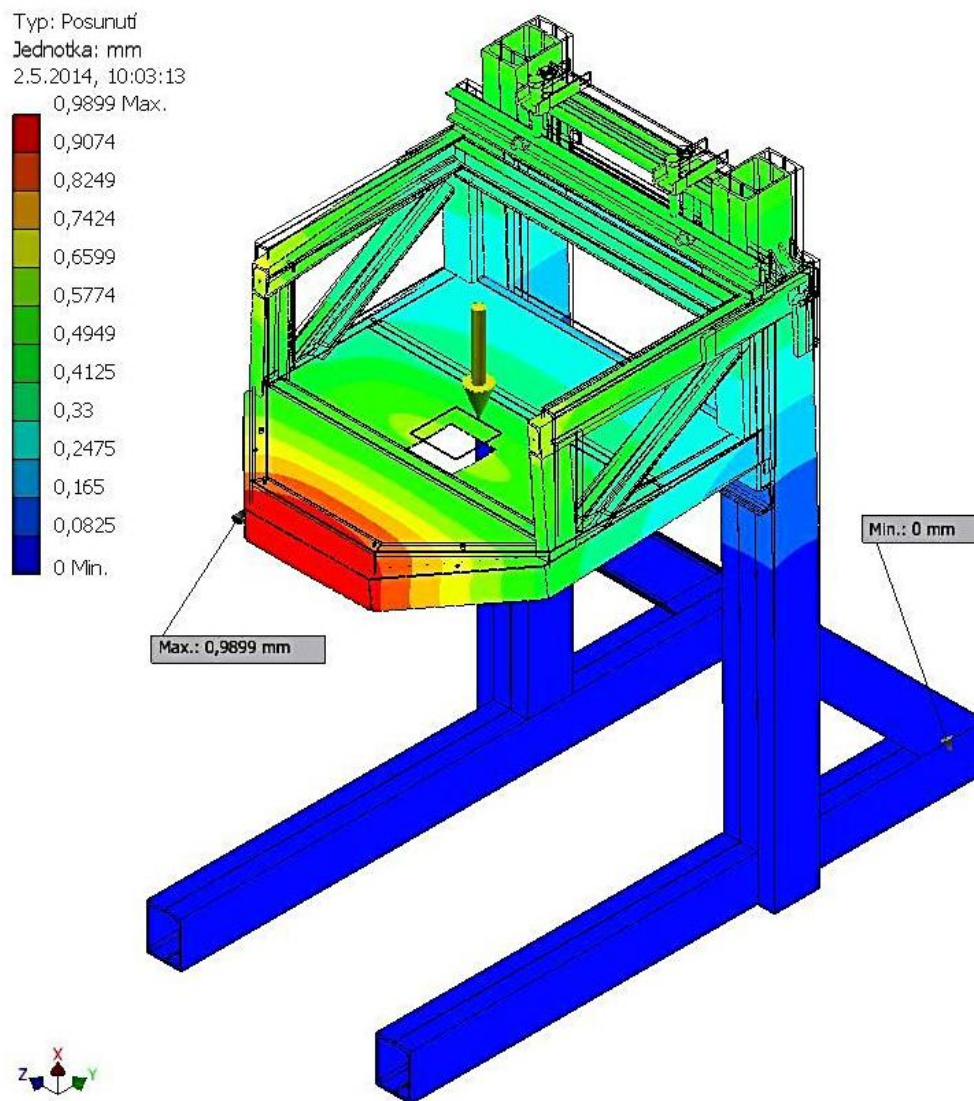


Obr.21 – Rozložení průběhu napětí v ocelové konstrukci agregátu

Použitá ocel ČSN 11373.0 má zaručenou mez kluzu min. 220 MPa. Koeficient bezpečnosti navrhované konstrukce pak vyplývá ze vztahu:

$$k_{bzp} = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{220}{59,44} = 3,7 \quad (9)$$

Obrázek č.22 znázorňuje výsledek simulace posunutí konstrukce působením spojitého zatížení.

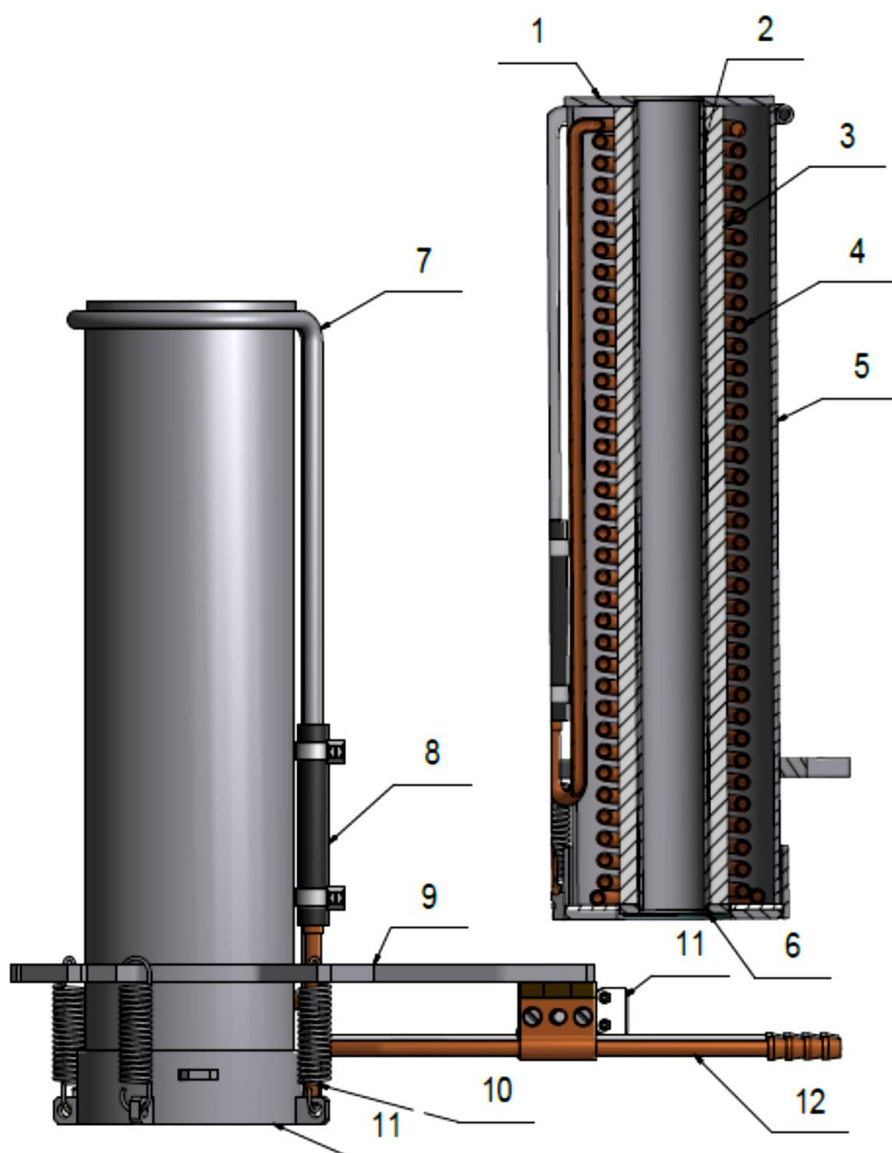


Obr.22 – Simulace posunutí zatížené konstrukce

Hodnoty zjištěné pomocí výpočtu metodou konečných prvků jsou vyhovující a lze konstatovat, že ocelová konstrukce je využitelná pro provozní nasazení s předpokládaným zatížením.

6.6 Návrh podhladinového výtoku skloviny

Pro distribuci skloviny k tvarovacímu stroji je navržen induktivně otápěný podhladinový výtok. Pro odebrání skloviny ze sklářské pánve existuje celá řada systémů. Na základě provozních zkušeností a provedené literární rešerše lze konstatovat, že právě podhladinový výtok dává nejlepší výsledky co do vnitřní homogenity distribuované skloviny.



Obr.23 – Boční pohled a řez podhladinovým výtokem skloviny

Konstrukce podhlinového výtoku je patrná z obrázku č.23. Horní příruba 1 je přisazena přímo na dno pánve. Případnému protečení skloviny je zabráněno trubkovým chladičem 7, kterým proudí chladicí voda. Sklovina protéká trubkou 2 zhotovenou z žáruvzdorné oceli, která dobře snáší styk s roztavenou sklovinou a má příslušnou klasifikační teplotu. Trubka je teplotně izolovaná 3 a je vložena v měděném induktoru 4, který je permanentně chlazený vodou z vodního chladicího okruhu. K tělesu pece je výtok upevněn přes přírubu 9, na kterou je pomocí pružin 10 upevněn spodní kryt 11. Tento způsob konstrukce byl zvolen z důvodu velké dilatace středové trubky při teplotě agregátu na provozní teploty.

Induktivní výtok je napájen středofrekvenčním generátorem VEZAS (typ VEZ SF). Průměr výtokového otvoru je v závislosti na tvarovaném sortimentu dimenzován pomocí výměnné redukce. Parametry generátoru jsou převzaty z technického listu výrobce:

✓ pracovní frekvence	7 - 12 kHz;
✓ výstupní sf. výkon	12 kW;
✓ min. akceptovatelný účinník sf. zátěže	0,08;
✓ regulace výstupního výkonu - spojitě	0 to 100 %;
✓ chladicí systém – průtok	1 - 1,5 /min.;
✓ teplota okolí	0 to 35 °C;
✓ napájecí síťové napětí - příkon max. 18kVA	3x 400 V / 50Hz;
✓ rozměry skříně	550 x 1300 x 700 mm;
✓ hmotnost	60 kg;

6.7 Uplatnění principů detailního konstruování (DFX)

I přes skutečnost, že se u inovovaného malého tavicího agregátu primárně nepočítá s hromadnou výrobou, byly v průběhu celého procesu tvorby návrhu uplatněny principy detailního konstruování (DFX).

V první řadě se jednalo o metodu *Design for Assembly* (DFA). Vzhledem k hmotnosti jednotlivých dílů sestavy je snaha o usnadnění montáže naprosto oprávněná. Celá sestava je pojatá jako stavebnice, kde mají jednotlivé díly přesně vymezené místo. Za zmínku stojí především sestava vnitřní radiální vyzdívky a odnímatelná konzola, která umožňuje montáž tělesa agregátu v optimálních podmínkách.

Vzhledem k potřebě časté demontáže a výměny žárovzdorných komponentů agregátu byly dále využity metody *Design for Disassembly* (DFD) a *Design for environment* (DFE). Jednotlivé komponenty jsou snadno demontovatelné a oddělitelné. Suroviny lze snadno separovat a postoupit k další recyklaci a přepracování.

6.8 Přezkoumání konstrukčního návrhu pomocí metody FMEA

Existuje celá řada metod, kterými můžeme přezkoumat konstrukční návrh. V tomto případě byla použita metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) a to s cílem odhalit možné závady ještě ve fázi návrhu a přijmout opatření, která je eliminují. Byla provedena systematická kontrola návrhu inovovaného malého tavicího agregátu, provedena sumarizace možných poruch, analýza jejich příčin a následků.

U všech vad, které by se mohly na zařízení vyskytnout, byla stanovena tři kritéria. Možná četnost výskytu vady, hodnocení závažnosti vady a možnost detekce vady. Každé kritérium bylo ohodnoceno číslem na stupnici 1 – 10. Vzájemným vynásobením těchto tří kritérií bylo získáno rizikové číslo RPN. Celý proces přezkoumání je zdokumentován v příloze č.2. Pro návrh nápravných opatření byly stanoveny následující podmínky – rizikové číslo vyšší než 50 nebo závažnost vady vyšší než 8.

Výstupem FMEA-K inovovaného malého tavicího agregátu jsou následující opatření:

- ✓ Jako riziková byla vyhodnocena operace usazování pánve do tělesa pece. Při usazování bylo navrženo použití středícího přípravku.
- ✓ Bylo doporučeno provést před započetím teploty vizuální kontrolu tvaru a směru plamene a teplotní křivku sledovat a upravovat pomocí nezávislého vizualizačního systému.

- ✓ Pro montáž indukčního výtoku na agregát bylo doporučeno využití kontaktního tmelu. Zabrání se tak podtečení skloviny.
- ✓ Při montáži závěsné konzole je doporučena 100% kontrola utahovacího momentu pojistných šroubů a jejich označení, např. barvou.
- ✓ Po montáži je doporučeno umístění výstražné tabulky s maximální povolenou nosností.
- ✓ U hlavního rámu je doporučena namátková kontrola svaru pomocí ultrazvuku, doložená příslušným certifikátem.
- ✓ Z důvodu možných závad při montáži MTA, způsobených nepozorností a nedůsledností montážních techniků, se doporučuje provést před temperací zařízení funkční zkoušku agregátu jako celku.

7. ZÁVĚRY A ZHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI

V této kapitole je provedeno zhodnocení diplomové práce. Jsou zde vyhodnoceny technicko-ekonomické přínosy řešení a vyvozeny závěry vyplývající z řešení diplomové práce. Na konci kapitoly je provedeno závěrečné zhodnocení.

7.1 Zhodnocení technických a ekonomických přínosů řešení

7.1.1 Zhodnocení technických přínosů

- ✓ V rámci řešení diplomové práce se podařilo navrhnout inovaci malého tavicího agregátu pro tavení skla.
- ✓ Navržená konstrukce, využívající plynového ohřevu a induktivně otápeného podhlahinového výtoku, dává předpoklad bezproblémového užívání v náročných podmínkách sklářského provozu.
- ✓ Kompaktní konstrukcí tělesa agregátu a absencí výtokového feedru došlo ke snížení požadavku na podlahovou plochu pracoviště o 6 m².
- ✓ Zmenšením vnitřního prostoru agregátu a využitím lepších izolačních materiálů lze přepokládat snížení energetické náročnosti agregátu a snížení tepelné zátěže obsluh.
- ✓ Nahrazením výtokového feedru podhlahinovým výtokem dojde ke snížení investičních nákladů na realizaci agregátu a lze předpokládat zvýšení výtěžnosti z utavené skloviny.
- ✓ Snížením celkové spotřeby paliva a snížením množství použitých konstrukčních materiálů má řešení pozitivní dopad na životní prostředí.

Konstrukční návrh se zabýval pouze koncepcí vlastního tavicího agregátu. Pro případ realizace je třeba dopracovat elektrická schémata regulace teploty, zapojení plynových rozvodů a systémy homogenizace skloviny a rekuperace spalin.

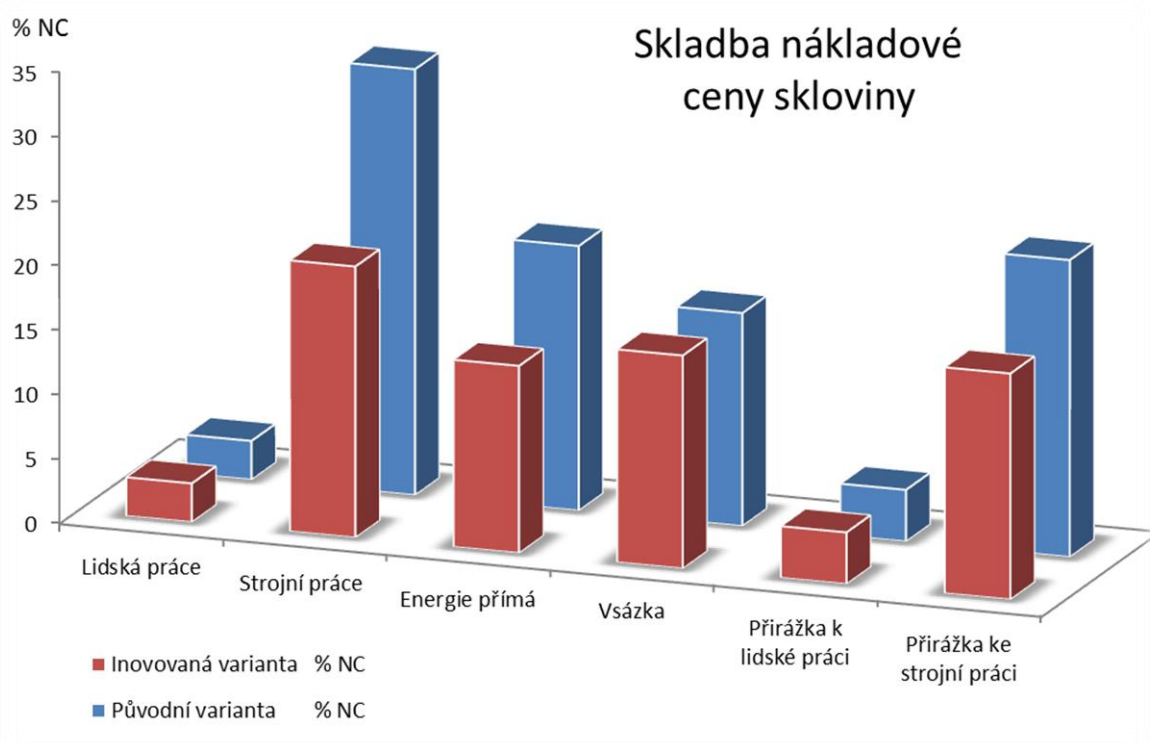
7.1.2 Zhodnocení ekonomických přínosů

- ✓ Předpokládané výrobní náklady inovovaného řešení malého tavicího agregátu se pohybují mezi 1,4 – 1,5 mil. Kč. Náklady na stavbu současného řešení jsou výrobnímu závodu účtovány ve výši 3,5 mil Kč. Využitím inovované konstrukce malého tavicího agregátu lze očekávat úsporu investičních prostředků ve výši cca. 2 mil. Kč pro jeden tavicí agregát. Předpokládaná úspora je zohledněna v nákladové ceně skloviny v položce strojní práce (viz. tabulka č.4). Kvalifikovaný odhad nákladů navržené varianty malého tavicího agregátu je součástí přílohy č.3.
- ✓ U stávající konstrukce dochází ke střídání středních a celkových oprav agregátu zhruba jednou za dvanáct měsíců. Náklady na celkovou opravu dosahují 95 % ceny stávajícího agregátu, náklady na střední opravu dosahují 55 % ceny stávajícího agregátu. Konstrukce inovovaného MTA dává předpoklad snížení nákladů na opravy ve výši cca. 20 % dosud vynakládaných finančních prostředků. Tato úspora je zohledněna v nákladové ceně skloviny v položce přírážka ke strojní práci (viz. tabulka č.4).
- ✓ Zmenšením vnitřního prostoru agregátu a využitím lepších izolačních materiálů lze přepokládat snížení energie potřebné pro utavení 1 kilogramu skloviny o cca. 30 %. Úspory energie na tavení jsou promítnuty v nákladové ceně skloviny v položce energie přímá (viz. tabulka č.4).

Nákladová položka	Původní varianta % NC	Inovovaná varianta % NC
Lidská práce	3	3
Strojní práce	33	21
Energie přímá	20,5	14,5
Vsázka	16,5	16,5
Přirážka k lidské práci	4	4
Přirážka ke strojní práci	23	17,5
Nákladová cena celkem:	100	76,5

Tabulka č.4 – Nákladové porovnání variant

- ✓ Z porovnání kalkulací nákladových cen vyplývá možnost snížení nákladové ceny skloviny na inovovaném MTA o cca. 24,5 %. Porovnání nákladové ceny skloviny mezi původní variantou a inovovanou variantou MTA je provedeno v tabulce č.4.
- ✓ Největších úspor v nákladové ceně utavené skloviny bude dosaženo v nákladových položkách strojní práce, přírážka ke strojní práci a energie přímá. Procentuální výše jednotlivých nákladových položek a porovnání dosud používaného a inovovaného malého tavicího agregátu je vizualizováno v grafu č.2.



Graf č.2 – Porovnání jednotlivých složek nákladové ceny skloviny

- ✓ Aplikací podhadinového výtoku dojde ke snížení ztrát při přepouštění. Dle zkušeností výrobního závodu lze předpokládat zvýšení celkové výtěžnosti a tím snížení nákladové ceny o dalších 5 %.

Realizací inovovaného tavicího agregátu lze, s přihlédnutím k finančním úsporám i zvýšené výtěžnosti z utavené skloviny, očekávat snížení nákladové ceny skloviny pro další zpracování na tvarovacím stroji o 29,5 %.

7.2 Závěrečné zhodnocení

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou spojenou s tavením skloviny v pánvových agregátech. Práce byla zpracována pro zadavatele diplomové práce, společnost Preciosa a.s., z důvodu potřeby snížení nákladové ceny utavené skloviny. V průběhu řešení byly navrženy konstrukční a technologické změny, které ve svém důsledku povedou ke splnění vytyčených cílů řešení.

Úvod diplomové práce si kladl za cíl seznámení se stávajícím stavem techniky. Je zde popsána problematika konstrukce stávajícího pánvového tavicího agregátu a zmapován technologický výrobní tok od založení vsázky až po následné operace na finálním výlisku. Podklady pro úvodní část byly získány strukturovanými rozhovory s kompetentními pracovníky zadavatele, využitím dat z PLM systému a z místního šetření.

Na základě zjištěných nedostatků stávajícího stavu byly specifikovány cíle diplomové práce, identifikovány inovační příležitosti a zformulováno inovační prohlášení. Byla provedena literární a patentová rešerše se zaměřením na zachycení současných trendů a možností zlepšení v oblasti pánvových pecí pro tavení skla, tavicích kelímků a způsobů otopu tavicích pecí. S ohledem na zjištěné skutečnosti byly navrženy možné varianty konstrukčního řešení a pomocí rozhodovací analýzy byl vybrán nejvhodnější koncept pro podrobné konstrukční zpracování.

Navržená konstrukce nabízí možné řešení formou minimalizace neefektivních prostorů pánvové pece. Spodní stavba je nahrazena ocelovým rámem, funkci feedru pece přebírá induktivně otápěný výtok, přisazený ke dnu pánve. Vlastní těleso pece, umístěné na závěsné konzole, využívá plynového ohřevu s tangenciálním prouděním spalín v prostoru okolo pánve. Potřebná teplota je zde dosahována spalováním směsi zemního plynu se vzduchem. Navržená konstrukce byla prověřena pomocí metody FMEA a na základě zjištěných skutečností byla navržena preventivní nápravná opatření. V závěru řešení byla vyhotovena výkresová dokumentace sestavy a vybraných součástí.

Provozní využití předložených výsledků diplomové práce dává předpoklad k významným úsporám investičních i provozních nákladů s přímým dopadem do nákladové ceny utavené skloviny. Podle provedené ekonomické rozvahy bude cena

utavené skloviny, oproti stávajícímu malému tavicímu agregátu, snížena o 29,5 %, čímž bude splněn hlavní cíl řešení. Dalšími nezanedbatelnými přínosy navrhovaného řešení jsou snížené prostorové nároky, příznivý dopad na bezpečnost a hygienu práce obsluh a lepší startovní pozice při plnění přísných ekologických limitů.

Seznam použité literatury:

- [1] *Katalog produktů Kanthal (nedatováno)*, získáno květen 2013
<http://www.kanthal.com/>
- [2] *Sborník přednášek 14-té konference o elektrickém a ostatních vysoce účinných způsobech tavení skla*, Česká sklářská společnost o.s., České Budějovice 2007, 134 s.
- [3] *Pokročilé technologie tavení*, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, prosinec 2005
<http://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/advancedmeltingtechnologies.pdf>
- [4] FÍK, J.: *Spalování plyných paliv a plynové hořáky*, GAS, Praha 1998, 232 s., ISBN 80-86176-01-0
- [5] SMRČEK, A. a kol.: *Tavení skla*, Česká sklářská společnost o.s., Jablonec nad Nisou 2008, 696 s., ISBN 978-80-904044-0-3
- [6] BARTUŠKA, M.: *Vady skla*, Práh, Praha 2001, 606 s., ISBN 80-7252-043-1
- [7] VOLF, M.B.: *Chemie skla*, SNTL, Praha 1978, 470 s.
- [8] MAŠÍN, I.: *Inovační inženýrství - Plánování a návrh inovovaného výrobku*, Skriptum TUL, Liberec 2012, 178 s., ISBN: 978-80-7372-852-6
- [9] ŠEVČÍK, L a kol.: *PLM systém a principy návrhu výrobků*, Skriptum TUL, Liberec 2010, 134 s., ISBN 978-80-7372-641-6
- [10] KOUCKÝ, J.: *Kameny, ověsy, perle*, Interní skriptum fy. Preciosa, Jablonec nad Nisou 2001, 1. vydání, 266 s.
- [11] KŘÍŽ, R. - VÁVRA, P.: *Strojírenská příručka (svazek 6)*, Scientia, Praha 1995, 291 s., ISBN 80-85827-88-3
- [12] PEŠÍK, L.: *Části strojů (2.díl)*, Skriptum TUL, Liberec 2010, 236 s., ISBN 978-80-7372-574-7
- [13] ŘASA, J. - ŠVERCL, J.: *Strojnické tabulky I*, Scientia, Praha 2004, 753 s., ISBN 80-7183-312-6
- [14] *Sborník přednášek 11-té konference o elektrickém a ostatních vysoce účinných způsobech tavení skla*, Česká sklářská společnost o.s., Poděbrady 1998, 157 s.

-
- [15] ASHTON, M.C.: *Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys*, získáno leden 2014 - <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [16] PEŠÍK, L.: *Části strojů (1.díl)*, Skriptum TUL, Liberec 2010, 226 s., ISBN 978-80-7372-573-0
- [17] LEPŠÍK, P. – MAŠÍN, I.: *Nástroje řízení projektů*, Skriptum TUL, Liberec 2012, 202 s., ISBN 978-80-7372-854-0
- [18] PETRŮ, M. - NOVÁK, O. - LEPŠÍK, P.: *Increase of the efficiency of the production lines for the spinning of inorganic nanofibers by the electrostatic field intensity optimization*, MM Science Journal, Number 4, 2012, pp. 382-385

Seznam výkresové dokumentace:

0-DP-12000657-1-00-00

2-DP-12000657-1-09-00

3-DP-12000657-9-03-00

4-DP-12000657-9-03-01

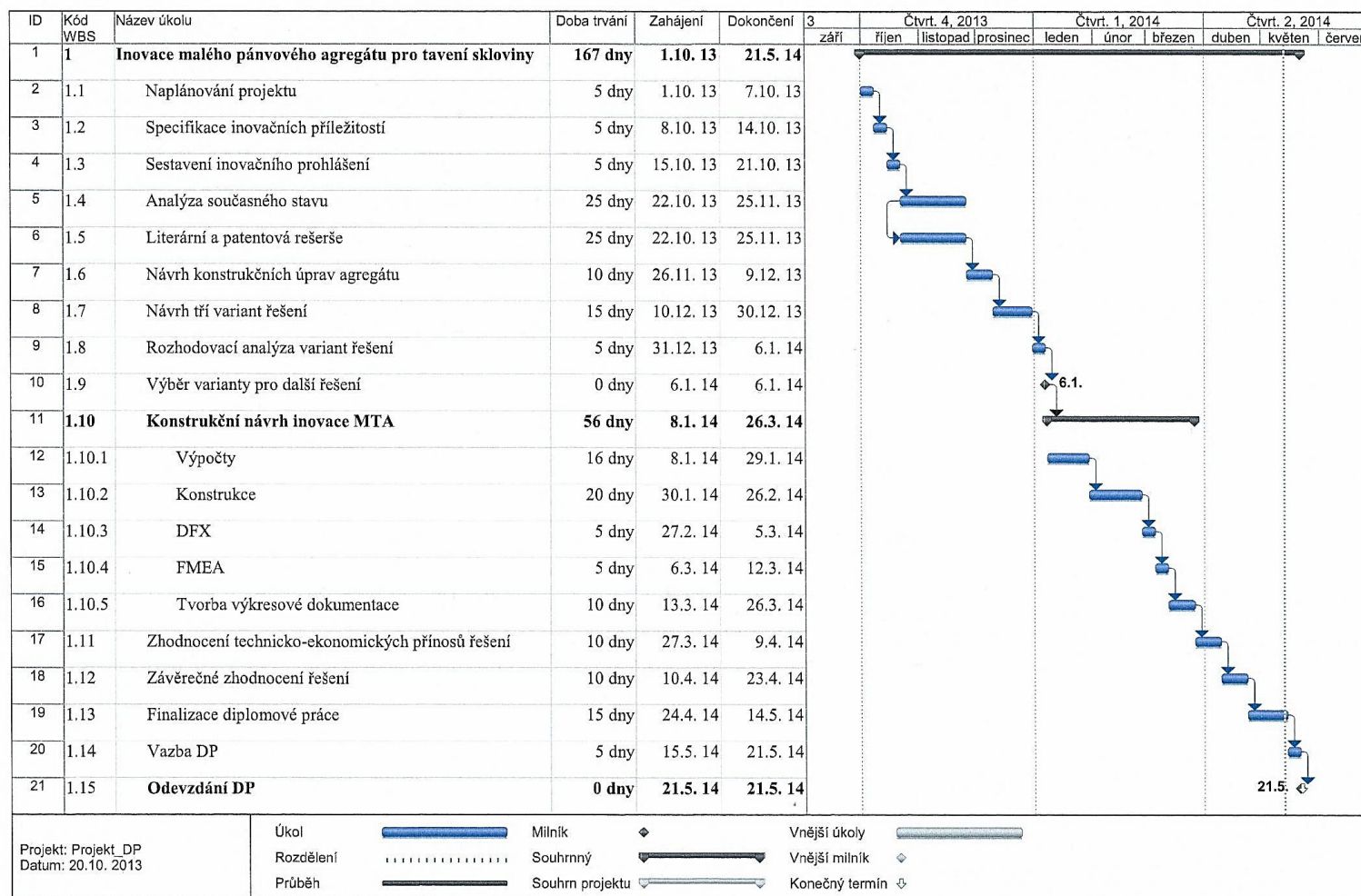
3-DP-12000657-9-03-02

4-DP-12000657-9-03-03

4-DP-12000657-9-03-04

3-DP-12000657-1-14-01

Příloha č.1 – Ganttův diagram projektu inovace MTA



Příloha č.2 – FMEA-K (část 1)

Součást	Místo poruchy	Možný způsob poruchy	Možný důsledek poruchy	Možné příčiny poruchy	Běžné kontroly	Současný stav				Doporučené opatření	Výsledný stav				
						Výskyt	Závažnost	Detekce	RPN		Přijatá opatření	Výskyt	Závažnost	Detekce	RPN
Těleso agregátu	pánev	není usazena symetricky	sklovina neprotéká do výtoku	nepozornost při montáži	vizuální	4	7	3	84	využití středícího přípravku	realizovat při montáži	1	7	1	7
		prasklá keramika	protéká sklovina	postup temperace	vizuální	4	9	6	216	kontrola t. křivky -vizualizace	realizovat při temperaci	2	9	3	54
	hořák	špatné usazení v tvarovce	lokální přehřívání pánve	nepozornost při montáži	vizuální	6	5	4	120	kontrola směru plamene	realizovat při temperaci	1	5	2	10
	hořáková tvarovka	prasklá keramika	prohoření izolace	prasknutí při temperaci	vizuální	3	4	3	36	kontrola teplotní křivky	realizovat při temperaci	2	4	1	8
	termo - článek	neměří přesně	nestabilní regulace	provedení vnějších spojů	funkční zkouška	3	5	2	30	kalibrace	realizovat před montáží	1	5	1	5
	izolace	deformovaná, netěsní	propálení vnějšího pláště	nekvalitní montáž	vizuální	3	4	2	24	měření termokamerou	realizovat po temperaci	1	4	1	4
Spodní výtok	induktor	netěsní	výron páry	nepozornost při montáži	vizuální	5	4	2	40	tlaková zkouška	realizovat před montáží	1	4	1	4
	horní příruba	netěsní	zatečení skloviny	nepozornost při montáži	vizuální	5	6	5	150	aplikace kontakt. tmelu	realizovat při montáži	2	6	3	36
	vniřní trubka	netopí	nízká viskozita skloviny	chybné sestavení dílu	neprovádí se	3	4	2	24	funkční zkouška	realizovat před montáží	1	4	2	8
	termo - článek	neměří přesně	nestabilní regulace	provedení vnějších spojů	funkční zkouška	4	6	2	48	kalibrace	realizovat před montáží	1	6	1	6
	upevňovací prvek	volný	zatečení skloviny	nepozornost při montáži	neprovádí se	4	6	2	48	kontrola M _k	realizovat při montáži	1	6	1	6

Příloha č.2 – FMEA-K (část 2)

Součást	Místo poruchy	Možný způsob poruchy	Možný důsledek poruchy	Možné příčiny poruchy	Běžné kontroly	Současný stav				Doporučené opatření	Výsledný stav				
						Výskyt	Závažnost	Detekce	RPN		Přijatá opatření	Výskyt	Závažnost	Detekce	RPN
Závěsná konzola	konstrukce	prasknutí svaru	destrukce konstrukce rámu	překročení povoleného zatížení	popsáno v návodu k obsluze	3	8	4	96	umístění vystražné tabulky s nosností	realizovat po teplotě	1	8	2	16
	uchycení konzole	chybí spojovací prvek	konstrukce nemá požadovanou nosnost	nepozornost při montáži	vizuální	3	8	3	72	pokayoke - závěrečná kontrola	realizovat při montáži	1	8	1	8
	uchycení konzole	šroub není utažen na předepsaný M_k	konstrukce nemá požadovanou nosnost	nepozornost při montáži	vizuální	4	6	5	120	100% kontrola utahovacího M_k , označit barvou	realizovat po montáži	1	6	1	6
Základní rám	horní část rámu	prasknutí svaru	destrukce konstrukce rámu	nekvalitní zpracování	vizuální	2	8	8	128	kontrola vybraných svarů	ultrazvuková kontrola - certifikát	1	8	2	16
	konstrukce	prasknutí svaru	destrukce konstrukce rámu	překročení povoleného zatížení	popsáno v návodu k obsluze	3	8	4	96	umístění vystražné tabulky s nosností	realizovat po teplotě	1	8	2	16

Příloha č.3 – Kvalifikovaný odhad nákladů na realizaci inovovaného MTA

Inovovaný malý tavicí agregát	jednotková cena	ks	celková cena
Ocelové konstrukce			
Dno	80 000,00 Kč	1	80 000,00 Kč
Bočnice			
Kryt			
Závěsná konzola	80 000,00 Kč	1	80 000,00 Kč
Hlavní rám	150 000,00 Kč	1	150 000,00 Kč
Pracovní podium	50 000,00 Kč	1	50 000,00 Kč
Keramika a izolace			
Segmenty radiálního zdiva	30 000,00 Kč	1	30 000,00 Kč
Formy segmentů	20 000,00 Kč	1	20 000,00 Kč
Dno	10 000,00 Kč	1	10 000,00 Kč
Formy dna	16 000,00 Kč	1	16 000,00 Kč
Pomocná keramika	1 500,00 Kč	2	3 000,00 Kč
Izolace	10 000,00 Kč	1	10 000,00 Kč
Hořáková tvarovka	10 000,00 Kč	1	10 000,00 Kč
Forma hořákové tvarovky	10 000,00 Kč	1	10 000,00 Kč
Pánev + víko	32 000,00 Kč	1	32 000,00 Kč
Forma pánve	55 000,00 Kč	1	55 000,00 Kč
Ostatní			
Hořák	25 000,00 Kč	1	25 000,00 Kč
Připojení hořáku + reg. řada	25 000,00 Kč	1	25 000,00 Kč
Měření a regulace	100 000,00 Kč	1	100 000,00 Kč
Induktivní výtok	50 000,00 Kč	1	50 000,00 Kč
Středofrekvenční generátor	200 000,00 Kč	1	200 000,00 Kč
Rekuperátor spalín	150 000,00 Kč	1	150 000,00 Kč
Zpracovací náklady			
Mzdové náklady	560,00 Kč	625	350 000,00 Kč
		Celkem:	1 456 000,00 Kč